



Aalto-yliopisto
Kemian tekniikan
korkeakoulu

Kemian tekniikan korkeakoulu
Materiaalitekniikan koulutusohjelma

Arijussi Väänänen

SÄHKÖLEVYN MEISTON LASKENNALLINEN TARKASTELU

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 1.5.2016.

Valvoja

Professori Antti Korhonen

Ohjaaja

Tekniikan tohtori Sampsa Laakso

Tekijä Arijussi Väänänen

Työn nimi Sähkölevyn meiston laskennallinen tarkastelu

Laitos Materiaalitekniikan laitos

Professuuri Muovaus ja pintatekniikka

Professuurikoodi MT-65

Työn valvoja Professori Antti Korhonen

Työn ohjaaja Tekniikan tohtori Sampsa Laakso

Päivämäärä 1.5.2016

Sivumäärä 98

Kieli Suomi

Teollisuudessa kulutetaan vuosittain yli 40 % koko maailman sähköenergiasta, josta kaksi kolmasosaa kuluu sähkömoottorien pyörittämiseen. Euroopan unionin tavoitteena on kasvattaa EU:n energiantehokkuutta 20 %:lla vuoteen 2020 mennessä sekä 27 %:lla vuoteen 2030 mennessä. Tammikuusta 2017 lähtien Euroopan unionissa astuu voimaan laki, jonka mukaan kaikkien 0,75–375 kW:n tehoalueen sähkömoottorien tulee vähintään täyttää IE3-hyötysuhdetaso. Tämän tavoitteen lisäksi Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio (IEC) aikoo lähitulevaisuudessa tiukentaa sähkökoneiden hyötysuhdeluokista lisäämällä uuden IE5-hyötysuhdeluokan. Nämä vaatimukset pakottavat sähkömoottorivalmistajia parantamaan sähkömoottorien energiatehokkuutta, esimerkiksi pienentämällä sähkömoottorien rautahäviöitä, jotta sähkömoottorit täyttävät uuden lain vaatimat ehdot.

Sähkömoottorien staattorilevyt valmistetaan tavallisesti 0,50 mm:n paksuisista sähköteräslevyistä, jotka meistetään lopulliseen muotoonsa. Meistoleikkaus aiheuttaa sähköteräksen leikkausreunaan suuria muodonmuutoksia, jotka jättävät leikkausreunaan jännityksiä. Nämä jännitykset aiheuttavat sähkökoneen magneettisten ominaisuuksien heikkenemisen ja rautahäviöiden kasvun.

Tässä diplomityössä tutkitaan elementtimallintamisen avulla meistoleikkauksesta aiheutuvien jännityksien suuruutta M400-50A-sähköteräksen leikkausreunassa, kun sähkölevyä leikataan terävällä, puoliterävällä ja tylsällä pistimellä. Työ suoritettiin yrityksen ”Scientific Forming Technologies Corporation” valmistamalla Deform-elementtimallinnusohjelmistolla, jota varten laadittiin tarkka materiaalmalli M400-50A-testimateriaalista. Materiaalin myötölujittuminen mallinnettiin Hollomonin-yhtälön avulla ja materiaalin vauriotuminen Cockroft-Latham-vauriomallin avulla. Mallintamisessa ei huomioitu lämpötilaa, sillä sen vaikutus leikkausprosessissa oletettiin olevan hyvin pieni. Simulaatiossa mitattiin M400-50A-sähköteräksen keskijännitykset sekä maksimi- ja minimipääjännitykset sähkölevyn leikkausreunan yläreunasta, keskikohdalta ja alareunasta. Sähkölevyn leikkausreunaan muodostui aluksi 0,04 mm:n päähän leikkausreunasta noin 55–98 MPa:n vetojännitys. Vetojännitys vaihtuu 0,08 mm:n siirtymän kohdalla noin 50–90 MPa:n puristusjännitykseksi. Simulaatitulosista havaittiin, että pistimen simuloidulla kulumisella ei näytä olevan merkittävää vaikutusta sähkölevyyn jäävien puristusjännitysten suuruuteen.

Avainsanat Meistoleikkaus, M400-50A, sähköteräs, rautahäviöt, jäännösjännitykset, FEM, elementtimenetelmä, simulointi, Deform, materiaalmalli, Hollomon, Cockroft-Latham

Author Arijussi Väänänen

Title of thesis Simulation Model of Electrical Steel Piercing

Department Department of Materials Science and Engineering

Professorship Forming and Surface Engineering

Code of professorship MT-65

Thesis supervisor Professor Antti Korhonen

Thesis advisor Doctor of Science Sampsa Laakso

Date 1.5.2016

Number of pages 98

Language Finnish

In industry, the annual consumption of electric energy is over 40 % of the worldwide consumption, and two thirds of that is consumed by electrical motors. The European Union aims to increase its energy efficiency by 20 % by 2020 and 27 % by 2030. In January 2017, a new law comes into effect in the EU region. According to this law electrical motors in the power range from 0.75 to 375 kW has to meet the energy efficiency class IE3. Also the International Electrotechnical Commission (IEC) standards are introducing stricter limits for the energy efficiency of electrical motors in the near future with IE5 energy efficiency class that is estimated to surpass the previous IE4 class requirements by 20 %. This means that the efficiency of electrical motors has to be improved and one way to achieve this improvement is to reduce the iron losses of electrical motors.

A typical silicon steel sheet has a thickness of 0,5 mm and it is punched to its final shape in a piercing process. The piercing process causes large deformations and residual stresses on a narrow zone of the cut edge. The deformations and residual stresses weaken the magnetic properties of silicon steel sheet and result in additional losses because the iron loss is increased after piercing.

In this master thesis, the stresses in the cut edge of M400-50A silicon steel, caused by piercing process, have been researched using finite element method (FEM). The model was done with commercial FEM solver Deform. In simulations, M400-50A silicon steel was blanked by using three different punches: sharp, semi-sharp and blunt. In order to simulate the piercing process of M400-50A silicon steel, a material model of M400-50A was required. In this work Hollomon model was selected for modeling strain hardening and Cockroft-Latham damage model was selected for modeling damage. Thermal properties were left out of scope in this study because their effect is assumed to be negligible in the piercing process.

In simulation results, the maximum and minimum principal stresses and the mean stresses of the simulated cut edge of the M400-50A silicon steel were measured. There was a tension stress of approximately 55–98 MPa at 0.04 mm from the cut edge. The tension stress changed to compressive stress at 0.08 mm from the cut edge. The compressive stress was approximately 50–90 MPa. The simulation results showed that the sharpness of the punch (when worn by 0,01–0,03 mm) made no significant difference in the magnitude of compressive stresses left in steel sheets.

Keywords Blanking, piercing, M400-50A, silicon steel, residual stresses, FEM, Finite Element Method, simulation, Deform, material model, Hollomon, Cockroft-Latham

Sisällysluettelo

Symboliluettelo

Esipuhe

1. Johdanto	1
1.1 Sähkömoottoreita koskevat säädökset	1
1.2 Rautasydämen rakenne	2
1.3 Staattorilevyn leikkausprosessin mallintaminen.....	3
1.4 Tutkimuksen rakenne.....	3
2. Dislokaatioteoria lyhyesti.....	4
2.1 Hilaviat	4
2.2 Plastinen muodonmuutos.....	7
3. Metallien käyttäytyminen jännityksen vaikutuksen alaisena.....	9
3.1 Materiaalin murtuminen	9
3.2 Vetokoe.....	10
3.3 Materiaalin käyttäytymistä kuvaavat materiaalimallit.....	15
3.3.1 Materiaalin kimmoisen alueen tarkastelu	16
3.3.2 Materiaalin myötöehdot	17
3.4 Materiaalin myötölujittuminen	19
3.5 Materiaalien vauriomallit.....	21
3.5.1 Johnson-Cook-malli	21
3.5.2 Cockroft-Latham-vauriomalli	22
3.6 Leikkausmurtokoe tasavenymätilassa.....	23
3.7 Materiaalin jäännösjännitykset	24
3.7.1 Jäännösjännitysten mittaaminen	26
4. Meistotekniikka	28
4.1 Meistoleikkain	28
4.2 Pistin ja tyyny	30
4.3 Ohutlevyn leikkaus ja lävistys	32
4.4 Leikkaaminen meistityökalulla.....	33
4.5 Leikkauspinnan muodostuminen	35
4.6 Leikkausvälin vaikutus leikkauspintaan	36
4.7 Leikkausvoima.....	39
5. Pii-rauta sähköteräs	41
5.1 Yleistä sähköteräksistä.....	41
5.2 Kidesuunnaton sähköteräs	42
5.3 Kidesuunnattu sähköteräs	44

6. Ferromagneettisen materiaalin magnetoituminen ja rautahäviöt	46
6.1 Yleistä magneettisista materiaaleista	46
6.2 Ferromagneettisen materiaalin magnetoituminen.....	47
6.3 Raudan magneettiset ominaisuudet	49
6.3.1 Hystereesisilmukka	50
6.3.2 Hystereesihäviöiden muodostuminen	51
6.3.3 Pyörrevirtahäviöiden muodostuminen	51
6.3.4 Rautahäviöiden vähentäminen	52
7. Jännityksen vaikutus sähkölevyn magneettisiin ominaisuuksiin	54
7.1 Magnetostriktio.....	54
7.2 Jäännösjännitysten vaikutus raudan magneettisiin ominaisuuksiin.....	56
7.3 Meistoleikkauksen vaikutus sähkölevyn magneettisiin ominaisuuksiin.....	57
8. Elementtimallintaminen.....	60
8.1 Elementtimenetelmä	61
8.2 Epälineaarinen elementtimenetelmä	62
9. Materiaalimallin määrittäminen.....	65
9.1 Koemateriaali.....	65
9.2 M400-50A-sähköteräksen vetokoe	66
9.3 M400-50A-sähköteräksen leikkausmurtosimulaatio tasojännitystilassa	68
10. Sähkölevyn meistoleikkauksen simulointi	74
11. Yhteenveto ja johtopäätökset	92
12. Ehdotukset jatkotutkimukselle	94
Lähdeluettelo.....	95

Symboliluettelo

Symboli	Selite
Dislokaatioteoria:	
\bar{b}	Burgers-vektori (siirrosvektori)
\bar{t}	Dislokaatioviiva
Lujuusoppi:	
A_0	Alkuperäinen poikkipinta-ala
a_0	Vetokoesauvan suoran osan paksuus
Ad	Deformoituneen materiaalin poikkipinta-ala
b_0	Vetokoesauvan suoran osan leveys
L_c	Vetokoesauvan koepituus
L_0	Vetokoesauvan alkumittapituus
L_t	Vetokoesauvan kokonaispituus
L_u	Vetokoesauvan loppumittapituus
ΔL	Vetokoesauvan alkumittapituuden muutos
S_0	Vetokoesauvan suoran osan poikkipinta-ala
l	Vetokoesauvan kiinnityspäät
R_e	Myötöraja
R_{eH}	Ylempi myötöraja
R_{eL}	Alempi myötöraja
$R_{p0,2}$	0,2-myötöraja
ε	Pitkittäissuuntainen venymä
ε_{\perp}	Poikittaissuuntainen venymä
ε_u	Murtovenymä
ε_{ins}	Insinöörivenymä
$\bar{\varepsilon}, \varepsilon_{tod}$	Todellinen venymä

$(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$	Moniaksiaalinen venymätila
σ_{ins}	Insinöörijäännitys
$\bar{\sigma}, \sigma_{tod}$	Todellinen jännitys
σ	Kuormitusnopeus
σ_p	Suhteellisuusraja
σ_E	Kimmoraja
σ_m	Myötölujuus
σ_j	Jäännösjäännitys
$(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$	Moniaksiaalinen jännitystila
$(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$	Pääjäännitykset
σ_{vert}	Vertailujännitys
F	Voima
E	Kimmokerroin
R_m	Murtolujuus
$(\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz})$	Leikkausjännitykset xy-, yz- ja xz-tasossa
G	Liukukerroin
$\%CW$	Myötölujittumisaste
n	Myötölujittumiseksponentti
K	Lujuuskerroin
V	Tilavuus
ν	Poissonin luku
λ	Säteilyn aallonpituus
d	Tasoetaisyys
2θ	Diffraktiokulma
Johnson-Cook-malli	
A	Materiaalin myötölujuus huoneenlämmössä
B	Myötölujittumistermi
C	Lujittumista kuvaava vakio

σ	Materiaalin myötölujuus
$\overline{\varepsilon^p}$	Plastinen muodonmuutos
$\dot{\bar{\varepsilon}}$	Plastisen muodonmuutoksen nopeus
$\dot{\bar{\varepsilon}}_0$	Referenssimuodonmuutosnopeus
m	Terminen pehmeneminen
T	Työkappaleen lämpötila (°C)
T_0	Huoneenlämpötila (°C)
T_{melt}	Materiaalin sulamispiste (°C)
Cockroft-Latham-vauriomalli	
C	Vaurioitumisen kriittinen arvo
σ	Materiaalin suurin vetojännitys
ε^f	Murtovenymä
ε_p	Vastaava plastinen venymä
Meistotekniikka	
P	Jousivoima
c	Jousivakio
f	Venymä
B	Tyynyn minimileveys
b	Leikattavan aukon suurin mitta B :n suunnassa
H	Tyynyn paksuus
D_{min}	Pyöreän pistimen pienin halkaisija
s	Leikattavan levyn paksuus
E_{min}	Neliskulmaisen pistimen sivun pienin pituus
L_{max}	Pistimen maksimipituus
d	Pistiminen halkaisija
τ_b	Leikkausmurtolujuus
u	Leikkausväli

R	Leikkauslujuus
C	Leikkauspinnan laadusta riippuva vakio
L	Leikkausviivan pituus
k	Leikkausvastus
F	Leikkausvoima
F_{max}	Maksimileikkausvoima

Sähkömagnetismi:

H	Magneettikentän voimakkuus
$M-H$	Magnetoitumakäyrä
M_s	Kyllästysmagnetoituma
φ	Magneettivuo
B	Magneettivuontiheys
B_r	Remanenssivuontiheys
H_c	Koersitiivikentänvoimakkuus
λ	Magnetostriktio
μ	Permeabiliteetti

Lyhenteet

FEM	Finite Element Method, Elementtimenetelmä
DIC	Digital Image Correlation, Digitaalinen kuvantamismenetelmä
ALE	Arbitrary Lagrangian Eulerian
RD	Rolling Direction, Valssaus suunnan mukainen
TD	Transverse Direction, Vastakkainen valssaus suunta
smv	Sähkömotorinen voima
mmv	Magnetomotorinen voima

Esipuhe

Opiskelu-aika ja erityisesti teekkarikulttuuri ovat olleet minulle arvokkaita kokemuksia. Monesti kuulee sanottavan, että opiskelu-aika on ihmisen parasta aikaa. Mielestäni tämä pitää paikkansa, kunhan muistaa pitää opiskelun päätavoitteen, eli valmistumisen mielessä. Opiskelu-aika on yksi suurista elämänvaiheista, joka on nyt osaltani tullut tiensä päähän. Vaikka nyt onkin aika siirtyä uusiin haasteisiin ja jättää opiskelijaelämä taakse, en silti tule unohtamaan teekkarimieltä ja siihen kuuluvaa asennetta.

Tämän diplomityön aihe oli varsin poikkitieteellinen, mikä teki työn tekemisestä hyvin mielenkiintoisen ja osittain haastavan. Tutkimus tehtiin Euroopan unionin rahoittamana ja se suoritettiin Aalto-yliopiston Konetekniikan laitoksen tuotantotekniikan laboratoriossa, yhteistyössä ABB Oy:n kanssa.

Erityisesti haluan kiittää ohjaajaani Sampsa Laaksoa asiantuntevista neuvoista ja kaikesta avusta koko diplomityöprosessin aikana. Suuret kiitokset myös työni valvojalle professori Antti Korhoselle, jolta sain kuulla tästä diplomityöaiheesta. Lisäksi haluan kiittää sähkötekniikan professori Antero Arkkiota, konetekniikan professori Kalevi Aaltosta, ABB Oy:n edustajana toiminutta Timo Holopaista sekä konetekniikan laitoksen laborioteknikko Kim Widellia asiantuntevista neuvoista ja suuresta panostuksesta työn edistymisen kannalta tärkeisiin asioihin. Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja tyttöystävääni kaikesta tuesta koko diplomityöprosessin aikana.

Espoossa 1.5.2016

Arijussi Väänänen

1. Johdanto

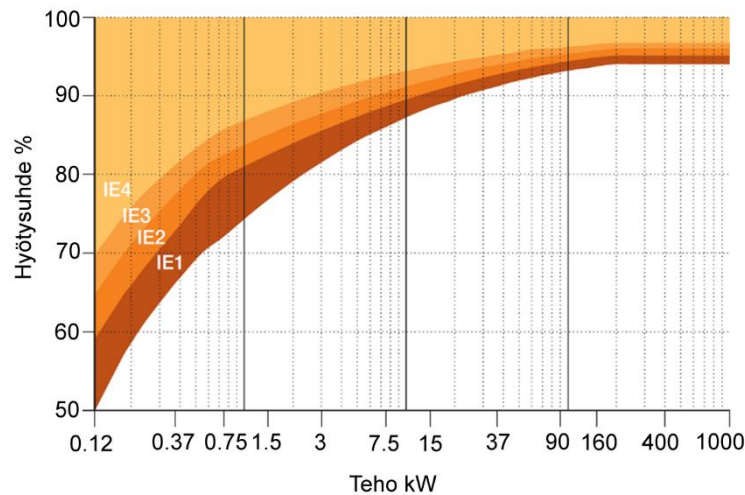
Tämän työn tarkoituksena on tutkia sähkökoneiden rautasydämien valmistuksessa käytettävän M400-50A-sähkölevyn leikkausprosessista aiheutuvien jännityksien suuruutta sähkölevyn leikkausreunassa elementtimallintamisen avulla. Aluksi tutustutaan sähkömoottorien energiantehokkuutta koskevaan lainsäädäntöön sekä esitellään työn rakenne, suoritustapa ja tavoitteet.

1.1 Sähkömoottoreita koskevat säädökset

Teollisuudessa kulutetaan vuosittain yli 40 %:ia koko maailman sähköenergiasta, josta kaksi kolmasosaa kuluu sähkömoottorien pyörittämiseen [1]. Tästä johtuen pienikin parannus sähkökoneiden energiantehokkuudessa johtaa merkittäviin energiansäästöihin. Nykypäivänä sähkökoneiden hyötysuhteen parantaminen on erityisen tärkeää, sillä Euroopan unionin tavoitteena on kasvattaa EU:n energiantehokkuutta 20 %:lla vuoteen 2020 mennessä ja 27 %:lla vuoteen 2030 mennessä [2].

Kuvassa 1 on esitetty tällä hetkellä käytössä olevat Kansainvälisen sähköalan standardointiorganisaation (*International Electrotechnical Commission, IEC*) IEC/EN 60034-30-1:2014 standardin mukaiset, sähkömoottorien IE-hyötysuhdeluokat IE1, IE2, IE3 ja IE4. IEC aikoo lähitulevaisuudessa myös tiukentaa sähkökoneiden hyötysuhdeluokitusta lisäämällä uuden IE5-hyötysuhdeluokan, joka on nykyisin korkeinta IE4-hyötysuhdeluokkaa 20 % korkeampi [3]. Tämän tavoitteen lisäksi Euroopan komission asetuksissa 640/2009 ja 04/2014 on määritetty erilliset vaatimukset sähkömoottorien hyötysuhdetasoille, jolloin tammikuusta 2017 lähtien astuu voimaan laki, jonka mukaan kaikkien 0,75–375 kW:n tehoalueen sähkömoottorien tulee vähintään täyttää IE3-hyötysuhdetaso (erittäin korkean tason hyötysuhde). [4, 5] Nämä vaatimukset pakottavat sähkökonevalmistat parantamaan sähkömoottorien energiatehokkuutta. Energiatehokkuutta voidaan parantaa esimerkiksi pienentämällä sähkömoottorin rautahäviöitä. Mitä pienemmät rautahäviöt ovat, sitä parempi hyötysuhde moottorilla on. Matalamman energiankulutuksen lisäksi korkeamman hyötysuhteen sähkömoottoreilla saavutetaan matalammat CO₂-päästöt, pidempi moottorin elinikä sekä samalla pidemmät huoltovälit verrattuna IE1- tai IE2-tason sähkömoottoreihin. Näin ollen korkeamman

hyötysuhdeluokan sähkömoottorien käytöstä seuraa myös matalammat elinkaarikustannukset [5], mikä myös osaltaan kannustaa sähkömoottorivalmistajia kehittämään sähkömoottoreita entuudestaan.



Kuva 1. IEC 60034-30-1:2014 standardin mukaiset sähkömoottorien hyötysuhdeluokat (IE1, IE2, IE3 ja IE4). Lähtitulevaisuudessa Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio (IEC) lisää hyötysuhdeluokan IE5, joka on 20 %:ia parempi kuin hyötysuhdeluokka IE4. [3]

1.2 Rautasydämen rakenne

Sähkökoneiden, eli sähkömoottorien ja generaattorien, rautasydämet koostuvat paikallaan olevasta staattorista ja sen sisällä pyörivästä roottorista. Sähkökoneen staattori ja roottori valmistetaan pinoamalla yhteen useita yleensä 0,50 mm paksuisia eristettyjä piirauta-ohutlevyjä, joita yleisesti kutsutaan sähkölevyiksi. Sähköteräksset ovat erikoisteräksiä, jotka sisältävät keskimäärin noin 2–3 %:ia piitä, loppuosan koostuessa lähinnä raudasta [6, 7].

Yleensä staattori- ja roottorilevyt meistetään lopulliseen muotoonsa, koska meistoleikkaus soveltuu erinomaisesti sarjatuotantoon, suurien kappalemäärien valmistamiseen ja tarkkojen muotojen leikkaamiseen. Meistoleikkauksen aikana sähköteräksen leikkausreunassa tapahtuu suuria muodonmuutoksia, jotka jättävät leikkausreunaan jännityksiä. Tämä taas aiheuttaa sähkökoneen magneettisten ominaisuuksien heikkenemisen sekä syntyvien rautahäviöiden kasvun. [8, 9]

1.3 Staattorilevyn leikkausprosessin mallintaminen

Tässä diplomityössä tutkitaan elementtimallinnuksen (*Finite Element Method, FEM*) avulla meistoleikkauksesta aiheutuvien jännityksien suuruutta M400-50A-sähköteräksen leikkausreunassa, kun sähkölevyä leikataan terävällä, puoliterävällä ja tylsällä pistimellä. Tutkimuksessa käytettiin yrityksen ”Scientific Forming Technologies Corporation” (SFTC) Deform-elementtimallinnusohjelmistoa, jota varten laadittiin tarkka materiaali-malli käytetystä M400-50A-sähköteräksestä vetokokeen ja leikkausmurtokokeen avulla. Mallintamisessa ei huomioitu lämpötilaa, sillä sen vaikutus leikkausprosessissa oletetaan olevan hyvin pieni.

1.4 Tutkimuksen rakenne

Diplomityön alussa perehdytään taustalla olevaan teoriaan. Ensin tutustutaan lyhyesti materiaalien hilavirheisiin ja plastiseen muodonmuutokseen. Seuraavaksi perehdytään ohutlevyn käyttäytymiseen jännityksen vaikutuksen alaisena, käsittelemällä muun muassa vetokoe, metallien yleisimmät myötöehdot, metallien myötölujittuminen sekä myötölujittumista kuvaava Hollomonin-yhtälö. Tämän lisäksi käsitellään Johnson-Cookin ja Cockcroft-Lathamien vauriomallit. Lisäksi tarkastellaan meistoleikkauksen pääperiaatteita sekä tekijöitä, jotka vaikuttavat leikkausreunan muodostumiseen.

Luvussa 5 käsitellään piirauta-sähköteräkset, jossa pääpaino pidetään kidesuunnattomassa sähköteräksessä. Luvun 6 alussa esitellään ferromagneettisen materiaalin magnetoituminen, jonka jälkeen käsitellään muun muassa rautahäviöiden syntymiseen vaikuttavat tekijät. Luvussa 7 tarkastellaan meistoleikkauksen vaikutusta sähköteräksen magneettisiin ominaisuuksiin. Lopuksi esitellään lyhyesti elementtimallintamisen pääpiirteet.

Työn kokeellinen osuus koostuu koemateriaalina käytetyn kidesuunnattoman M400-50A-sähköteräksen materiaalmallin luomisesta, minkä jälkeen tarkastellaan Deform-elementtimallinnusohjelmiston avulla meistoleikkauksen vaikutusta syntyvien jännitysten suuruuteen. Viimeiseksi esitellään johtopäätökset ja suositukset jatkotutkimukselle.

2. Dislokaatioteoria lyhyesti

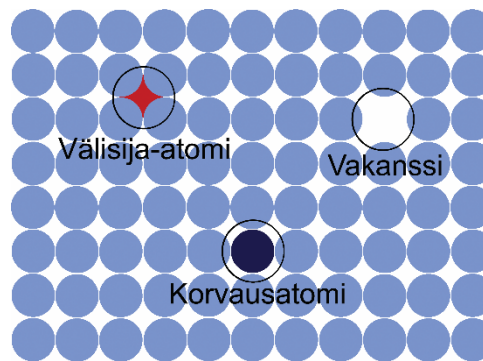
Materiaalia leikattaessa sen leikkausreunassa tapahtuu suuria muodonmuutoksia, jotka johtuvat materiaalin kiderakenteesta ja siinä olevista hilavioista. Hilavioilla on merkittävä vaikutus materiaalin käyttäytymiseen ja sen mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen. Tässä luvussa käsitellään metallien yleisimmät hilaviat sekä näiden yhteys materiaalin plastiseen eli pysyvään muodonmuutokseen.

2.1 Hilaviat

Metallikiteen hilarakenne ei ole koskaan täysin virheetön tai säännöllinen, mikä johtuu muun muassa materiaalissa olevista vieraista seosatomista ja sulkeumista. Tällöin osa materiaalin hilapisteistä jää täyttymättä sekä jotkin atomitasot vajaiksi. Materiaalin häiriötekijöitä kutsutaan yleisesti hilavioiksi. Hilaviat ovat kohtia, joissa atomien asemat poikkeavat materiaalin säännöllisen hilan määräämistä asemista, ja niillä on merkittävä vaikutus metallin mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen. Vaikka hilavikojen kohdalla metallikiteen säännöllinen rakenne onkin häiriintynyt, hilaviat osoittavat kuitenkin tietynlaista säännöllisyyttä, sillä niiden on sopeuduttava metallin säännölliseen ympäristöön. Tästä johtuen materiaalien tyypillisimmät hilaviat voidaan luokitella yleisesti pistemäisiin tai yksi- ja kaksiulotteisiin hilavikoihin. [6, 10]

Pistemäinen hilavika on useimmiten vakanssi (kuva 2), jolla tarkoitetaan materiaalin säännöllisestä hilajärjestyksestä puuttuvaa atomia eli tyhjäksi jäänyttä hilapistettä. Vakanssit ovat termodynaamisia tasapainovikoja, joita esiintyy metallikiteessä aina, kun lämpötila ylittää absoluuttisen nollapisteen. Vakansseja esiintyy sekä metallikiteen sisällä että materiaalin raerajoilla. Useimmiten vakanssit muodostuvat materiaalin kylmämuokkauksen aikana. Vakanssit helpottavat materiaalin diffuusiota eli toisin sanoen helpottavat atomien liikkumista hilassa. Vakanssit muodostavat ympärilleen kimmoisen jännityskentän, jota ulkoiset jännitykset muuttavat, pyrkien siirtämään näitä vakansseja kiteessä. Vakanssit voivat myös itse siirtyä paikasta toiseen, jolloin jokin toinen atomi täyttää vakanssin, jättäen samalla oman paikkansa tyhjäksi eli uudeksi vakanssiksi. [6, 10]

Pistemäisenä hilavikana saattaa toimia myös jokin välisija- tai korvausatomi (kuva 2). Korvausatomi on jonkin liuenneen aineen atomi, joka korvaa kantahilan atomin. Sen on oltava kooltaan lähes samankokoinen kuin alkuperäinen atomi, jotta se pystyy täyttämään korvattavan atomin. Välisija-atomit ovat taas kooltaan erittäin pieniä atomeja, jotka mahtuvat metallihilan tyhjiin tiloihin muodostamiin aukkoihin. [6]



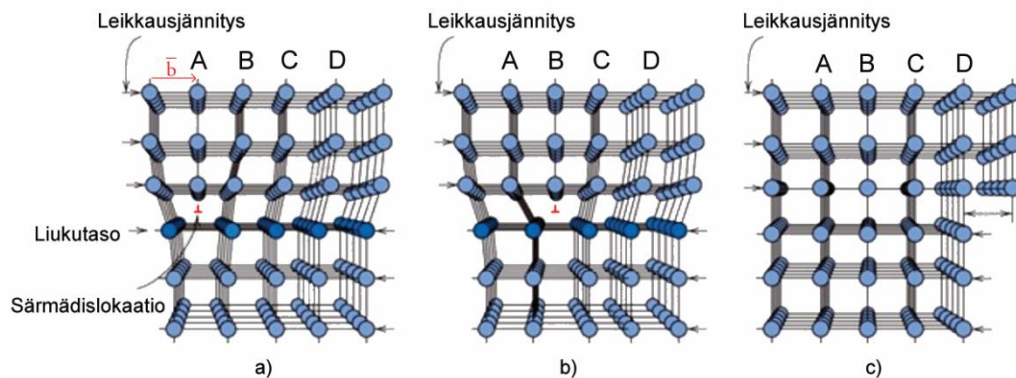
Kuva 2. Kuvassa on esitetty metallikiteen yksinkertaisessa kuutiollisessa hilassa olevat pistemäiset hilaviat. Vakanssi on tyhjäksi jäänyt hilapiste, välisija-atomi on taas erittäin pieni atomi, joka mahtuu metallihilan tyhjän tilan muodostaan aukkoon ja korvausatomi on jonkin liuenneen aineen atomi, joka korvaa kantahilan atomin. [6, muokattu lähteestä]

Yksiulotteisia hilavikoja kutsutaan dislokaatioiksi. Dislokaatiot ovat kapeita epäjärjestysalueita, metallikiteen säännöllisessä rakenteessa. Useimmiten ne ovat muodoltaan suljettuja käyriä, paitsi silloin, kun ne päättyvät kiteen pintaan. Materiaalissa tapahtuvat muodonmuutokset, sekä metallien lujittuminen, johtuvat pääasiassa dislokaatioiden liukumisesta. Dislokaatiot liukuvat atomien muodostamalla liukutasolla leikkausjännityksen voimasta, aiheuttaen yhden atomivälin suuruisen siirrosliukuman yleensä johonkin tiiviisti pakattuun liukusuuntaan. Tämä liukuminen alkaa jostakin tason kohdasta, mistä se lopulta leviää koko tason yli. [6, 10, 11] Dislokaatiot liukuvat perättäisinä aaltoina, koska yksittäisen sidoksen katkaiseminen on energeettisesti edullisempaa verrattuna siihen, että kaikki sidokset katkaistaisiin samanaikaisesti. [11]

Materiaalissa voi esiintyä kahdenlaista dislokaatiotyyppiä; särmä- tai ruuvidislokaatioita, sekä lisäksi näiden yhdistelmiä. Dislokaatiotyyppin määrittelee sen Burgers-vektori \vec{b} (siirrosvektori) sekä dislokaatioviiva $\vec{\ell}$. Burgers-vektorilla \vec{b} kuvataan dislokaation aiheuttaman liukutasen ylä- ja alapuolisten atomien keskinäisen siirroksen suuruutta ja suuntaa. Dislokaatioviivalla $\vec{\ell}$ kuvataan taas muotoaan muuttaneen ja muotoaan muuttamattoman alueen välistä rajakäyrää. Burgers-vektorilla \vec{b} kuvataan myös

dislokaation liikkeen aiheuttaman plastisen muodonmuutoksen suuruutta, sillä dislokaatioiden liukuessa liukutasoa pitkin, niiden viereiset atomit liikkuvat Burgers-vektorin \bar{b} suuruuden verran. Dislokaation luonne määräytyy suoraan sen kulman mukaan, jonka Burgers-vektori \bar{b} muodostaa positiivisen dislokaatioviivan $\bar{\epsilon}$ kanssa. Särmädislokaatioiden kohdalla Burgers-vektori \bar{b} on kohtisuorassa $\bar{\epsilon}$:tä vastaan, kun taas ruuvidislokaatioissa Burgers-vektori \bar{b} on yhdensuuntainen $\bar{\epsilon}$:n kanssa. Dislokaatiotyyppien yhdistelmässä Burgers-vektori \bar{b} muodostaa terävän kulman $\bar{\epsilon}$:n kanssa. [6, 10, 11]

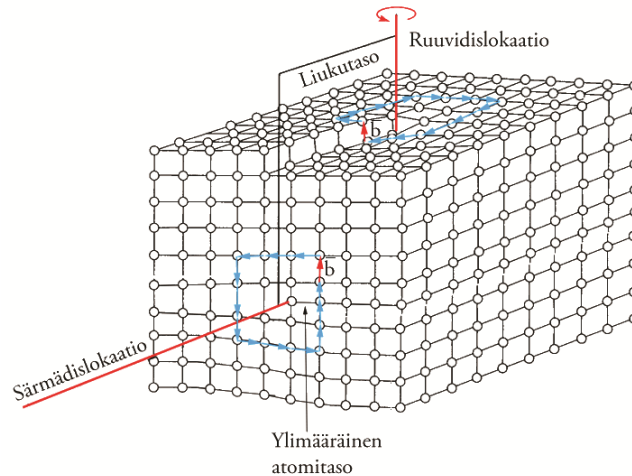
Särmädislokaatio muodostuu silloin, kun atomien muodostama hilataso päättyy kiteen keskelle, jolloin materiaalin kidehilaan muodostuu ylimääräinen atomitason puolikas. Kuvassa 3 on esitetty särmädislokaation liukuminen liukutasolla. Särmädislokaatio liikuu materiaalin atomitasolla yhtenäisenä aaltona siten, että sen ympärillä olevien atomien tasapainoasemat muuttuvat ketjumaisesti. Kun särmädislokaatio on liikunut koko rakenteen läpi, on se aiheuttanut materiaaliin yhden atomietäisyyden suuruisen plastisen muodonmuutoksen, kuten kuvasta 3 on nähtävissä. Särmädislokaation läheisyydessä olevat hilatasot kiertyvät epätasaisiksi, kuitenkin niin, että riittävän kaukana dislokaatiosta kiderakenne on jälleen säännöllinen. [6, 10, 11]



Kuva 3. Särämädislokaation liukuminen. Särämädislokaatio liikuu atomien muodostamalla liukutasolla, leikkausjännityksen voimasta, aiheuttaen yhden atomitason suuruisen siirrosliukuman. [6, muokattu lähteestä]

Ruuvidislokaatio muodostuu sellaisessa rakenteessa, jossa materiaalin hilatasot vääntyvät siten, että atomit muodostavat ruuviviivaa muistuttavan uran. Ruuvidislokaation Burgers-vektori \bar{b} on yhdensuuntainen dislokaatioviivan $\bar{\epsilon}$ kanssa, mutta muodonmuutos tapahtuu

dislokaatioviivaa \vec{t} ja Burgers-vektoria \vec{b} vastaan kohtisuorassa. [6, 10, 11] Kuvassa 4 on havainnollistettu ruuvidislokaation liukuminen.



Kuva 4. Ruuvidislokaatio muodostuu sellaisessa rakenteessa, jossa materiaalin hilatasot vääntyvät siten, että atomit muodostavat ruuviviivaa muistuttavan uran. Burgers-vektori \vec{b} on yhdensuuntainen dislokaatioviivan \vec{t} kanssa. [12, muokattu lähteestä]

Materiaalin kaksikulotteisia hilavikoja ovat taas esimerkiksi raerajat tai pinousviat, joihin ei perehdytä tarkemmin tässä työssä. Kaksikulotteiset hilaviat vaikeuttavat dislokaatioiden liikkumista, jotka siten lujittavat materiaalia ja kohottavat sen myötörajaa. Tämä ilmiö tunnetaan materiaalin myötölujittumisena, joka käsitellään myöhemmin. [6, 10, 11]

2.2 Plastinen muodonmuutos

Metallikiteen deformatumisella tarkoitetaan kiteessä ulkoisen voiman vaikutuksesta tapahtuvaa muodonmuutosta. Muodonmuutos voi tapahtua joko kimmoisesti eli palautuvasti, jolloin syntynyt muodonmuutos häviää ulkoisen voiman poistuttua, tai plastisesti eli pysyvästi, jolloin muodonmuutos ei enää häviä ulkoisen voiman poistuttua. [6, 10, 13] Tässä kappaleessa käsitellään ainoastaan plastinen muodonmuutos.

Plastisessa muodonmuutoksessa materiaalin atomitasot liukuvat toisiaan pitkin dislokaatioiden välityksellä, jolloin atomit siirtyvät nauhamaisesti alkuperäisiltä paikoiltaan uusiin tasapainoasemiin kuvan 3 mukaisesti. Kun ulkoinen kuormitus poistetaan, atomit eivät enää palaudu alkuperäisille paikoilleen, vaan asettuvat niitä lähinnä oleviin tasapainoasemiin. Kuten aikaisemmin todettiin, yksi dislokaatio aiheuttaa vain yhden atomivälin suuruisen muodonmuutoksen, mistä johtuen plastinen

muodonmuutos aiheutuu pääosin useiden dislokaatioiden perättäisestä liukumisesta. Usein materiaali pyrkii vastustamaan plastista muodonmuutosta myötölujittumalla, mikä nähdään materiaalin lujuuden ja kovuuden kasvuna. [6, 11] Ilmiötä käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.4.

Plastisessa muodonmuutoksessa atomitasojen liukuminen alkaa, kun liukupinnalla vaikuttava leikkausjännitys saavuttaa kriittisen arvon, jota kutsutaan myös kriittiseksi leikkausjännitykseksi tai leikkauslujuudeksi. Koska metallikiteet sisältävät useita mahdollisia liukutasoja ja -suuntia, liukuminen alkaa ensin sillä tasolla, jossa leikkausjännitys on suurin. Muut liukutasot aktivoituvat vasta silloin, kun leikkausjännitys kohoaa niilläkin kriittisen leikkausjännityksen suuruiseksi. On myös mahdollista, että aluksi toimiva liukusysteemi muodostuu myöhemmin epäedullisemmaksi toiseen liukusysteemiin verrattuna. Tällöin plastinen muodonmuutos jatkuu uuden systeemin mukaisella liukutasolla ja -suunnassa. Tämänkaltaisen moninkertainen liukuminen onkin tärkeä mekanismi materiaalin myötölujittumisen kannalta. Yleensä voidaan olettaa, että plastisessa muodonmuutoksessa tilavuus ei muutu, sillä muodonmuutos aiheutuu leikkausjännityksistä. [6, 10]

3. Metallien käyttäytyminen jännityksen vaikutuksen alaisena

Tässä luvussa käsitellään vetokokeen toimintaperiaate sekä siitä saatava jännitys-venymäkäyrä. Tämän lisäksi käsitellään sitkeiden metallien yleisimmin käytössä olevat, ajasta riippumattomat Trescan ja von Misesin myötöehdot, sekä materiaalin myötölujittuminen. Lisäksi esitellään lyhyesti tasavenymätilan leikkausmurtokoe sekä materiaalin vaurioutumista kuvaavat Johnson-Cookin-malli ja Cockcroft-Lathamin-vauriomalli. Lopuksi käsitellään materiaalin jäännösjännitysten muodostuminen sekä niiden mittaaminen.

3.1 Materiaalin murtuminen

Metallien käyttäytymiseen jännityksen vaikutuksen alaisuudessa vaikuttavat pääosin metallin rakenne, joka taas määräytyy sen kemiallisesta koostumuksesta ja aikaisemmasta käsittelystä. Useimmiten materiaalit luokitellaan joko hauraiksi tai sitkeiksi sen mukaan, miten ne tavallisesti käyttäytyvät huoneenlämmössä. Materiaalin ominaisuudet ja käyttäytyminen riippuvat kuitenkin myös olosuhteista, kuten lämpötilasta, jännitystilasta sekä kuormituksen muuttumisnopeudesta. Muuttamalla näitä olosuhteita, jokainen materiaali saadaan käyttäytymään sekä hauraasti että sitkeästi. Esimerkiksi huoneenlämmössä sitkeästi käyttäytyvä teräs murtuu hauraasti tietyn transitiolämpötilan alapuolella. Transitiolämpötilalla tarkoitetaan sitä lämpötilaa, jonka yläpuolella materiaali käyttäytyy sitkeästi ja vastaavasti sen alapuolella hauraasti. Lisäksi esimerkiksi hyvin hauras materiaali, kuten lasi tai marmori, saadaan käyttäytymään sitkeästi, mikäli sitä kuormitetaan suuren paineen alaisena. [10, 14, 15]

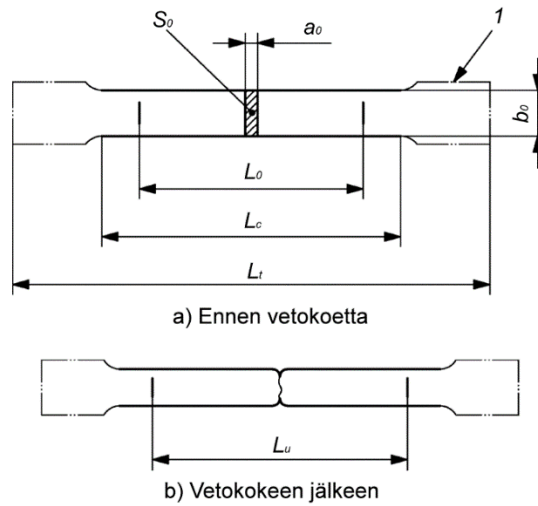
Materiaalin murtuminen voi olla luonteeltaan joko haurasta tai sitkeää, vaikkakin monien materiaalien murtopinnassa on usein samanaikaisesti havaittavissa sekä sitkeää että hauras murtumisalue. Hauras murtuma muodostuu, kun materiaaliin kohdistettavaa vetokuormitusta lisätään, jolloin atomien välisten koheesiovoimien kiinnityskyky ylittyy, minkä seurauksena materiaaliin syntyy äkillinen särö. Haurasmurtuma voi edetä joko raerajoja pitkin tai hilatasoja pitkin rakeiden läpi. Haurasmurtuma on aina vaarallinen, sillä se etenee erittäin suurella nopeudella useimmiten koko rakenteen läpi. Tämän lisäksi murtumiseen tarvittava energia eli murtumisvastus on hyvin pieni. Haurasmurtumassa ei synny juuri lainkaan plastista muodonmuutosta. [6, 14, 15, 16]

Kun sitkeään materiaaliin kohdistettavaa vetojännitystä lisätään, kiteen liukupinnan leikkausjännitys aiheuttaa plastisen liukumisen ennen kuin koheesiomurtuminen on mahdollista. Plastisesta myötämisestä seuraa useimmiten materiaalille siirtymisvaurio. Mikäli kuormitusta jatketaan entuudestaan, materiaali alkaa kuroutumaan jostakin kohtaa, mikä lopulta johtaa materiaalin murtumiseen. Ennen sitkeää murtumista materiaalissa on tapahtunut plastinen, energiaa sitova, myötövaihe. Sitkeässä murtumisessa materiaalin särönkasvu vaatii paljon energiaa ja suuren muodonmuutoksen. Tästä johtuen särönkasvu sekä materiaalin murtuminen tapahtuvat yleensä suhteellisen hitaasti [6, 14, 15, 16], jolloin materiaalin vaurioitumista on helpompi kontrolloida.

Lujuusopin kannalta on tärkeää tietää todellisten materiaalien makroskooppinen mekaaninen käyttäytyminen kuormituksen alaisena. Lujuusopillisesti tärkeimpiä materiaalin ominaisuuksia ovat jännityksen ja venymän välinen yhteys sekä materiaalin lujuus, jolla tarkoitetaan materiaalin kykyä kestää kuormitusta murtumatta. Tällaiset materiaalin ominaisuudet voidaan selvittää kokeellisesti erilaisten aineenkoetusmenetelmien avulla, joista yleisin on standardoitu vetokoe. [6, 10, 14, 16]

3.2 Vetokoe

Yksinkertaisuudessaan vetokoe toimii siten, että tasapaksuista vetokoesauvaa kuormitetaan yksiaksisiaalisesti niin kauan, kunnes koesauva murtuu. [6, 14, 17] Kuvassa 5 on esitetty EN ISO 6892-1 standardin mukainen suorakulmainen vetokoesauva ennen vetokoetta (5a) ja sen jälkeen (5b). Kuvassa a_0 on koesauvan suoran osan paksuus, b_0 on koesauvan suoran osan leveys ennen vetokoetta, L_c on koesauvan tasapaksun osuuden pituus eli koepituus, L_0 on alkumittapituus, L_t on koesauvan kokonaispituus, L_u on loppumittapituus, S_0 on koesauvan suoran osan poikkipinta-ala ennen vetokoetta ja l tarkoittaa koesauvan kiinnityspäitä. [17]



Kuva 5. Standardin EN ISO 6892-1 mukainen suorakulmainen vetokoesauva ennen vetokoetta (a) ja vetokokeen jälkeen (b). [17]

Kokeessa käytettävä kuormitusnopeus määritetään erikseen materiaaliakohtaisesti. Teräksiä koetettaessa kuormitusnopeus σ on yleensä 6–30 MN/mm², jännitystilan ollessa materiaalin ylemmän myötörajan R_{eH} alapuolella. Materiaalin ylempi myötöraja R_{eH} on se jännityksen arvo, millä myötäminen alkaa. [18] Yleensä vetokoe suoritetaan huoneenlämmössä, $23 \pm 5^\circ\text{C}$, käyttämällä vakiokuormitusnopeutta. [10, 14, 17]

Vetokokeessa vetosauva asetetaan kahden vetoleuan väliin, joista toinen leuoista pysyy paikallaan ja toinen taas suorittaa vetämisen. Paikallaan pysyvään leukaan kiinnitetään voima-anturi, joka mittaa koesauvaan kohdistuvan voiman. [13, 19] Koesauvan venymät voidaan laskea joko manuaalisesti mittaamalla koesauvaan merkittyjen mittausmerkkien siirtymät vetokokeen jälkeen ja vertaamalla sitä alkuperäisiin mittoihin, tai käyttämällä vetokokeessa pitkittäisiä tai poikittaisia ekstensiometrejä eli venymäantureita, jotka mittaavat venymät suoraan vetokokeen aikana. [6, 13]

Vetokokeen tulokset ilmaistaan jännitys-venymäkäyränä, jossa vaaka-akselina on insinöörivenymä ϵ_{ins} ja pystyakselina insinöörijännitys σ_{ins} . Insinöörijännitys ja -venymä saadaan määritettyä yhtälöiden (1) ja (2) avulla. Yhtälöissä F on voima, A_0 on koesauvan alkuperäinen poikkipinta-ala, L_0 on koesauvan alkumittapituus ja ΔL on alkumittapituuden muutos. [6, 19]

$$\sigma_{ins} = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ins} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

Todellisuudessa koesauvan poikkipinta-ala ei kuitenkaan pysy kokeen aikana vakiona, sillä materiaalin plastisoituessa sauvan poikkipinta-ala kuroutuu. Kun tämä koesauvan pinta-alan muutos otetaan huomioon, saadaan selville materiaalin todellinen jännitys. Todellinen jännitys on suurempi kuin sauvasta (voimasta ja alkuperäisestä poikkipinta-alasta) laskettu insinööri jännitys, mikä nähdään myös kuvasta 6. Ohutlevyjen elementtimallintamisessa materiaalin plastisen alueen jännitys-venymäyhteys pitää ilmoittaa todellisina jännityksinä ja venyminä, jotta mallinnus vastaisi mahdollisimman tarkasti materiaalin todellista käyttäytymistä. Tasavenymävaiheessa todellisen jännityksen laskeminen on suhteellisen helppoa, kun taas kuroumavaiheessa todellisen jännityksen määrittäminen on hieman hankalampaa, johtuen koesauvassa tapahtuvista voimakkaasti paikallistuneista muodonmuutoksista. Yhtälöissä (3) ja (4) on esitetty laskukaavat, joiden avulla voidaan määrittää materiaalin todellinen jännitys ja venymä. [6, 13, 19]

$$\sigma_{tod} = \sigma_{ins}(1 + \varepsilon_{ins}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{tod} = \ln(1 + \varepsilon_{ins}) \quad (4)$$

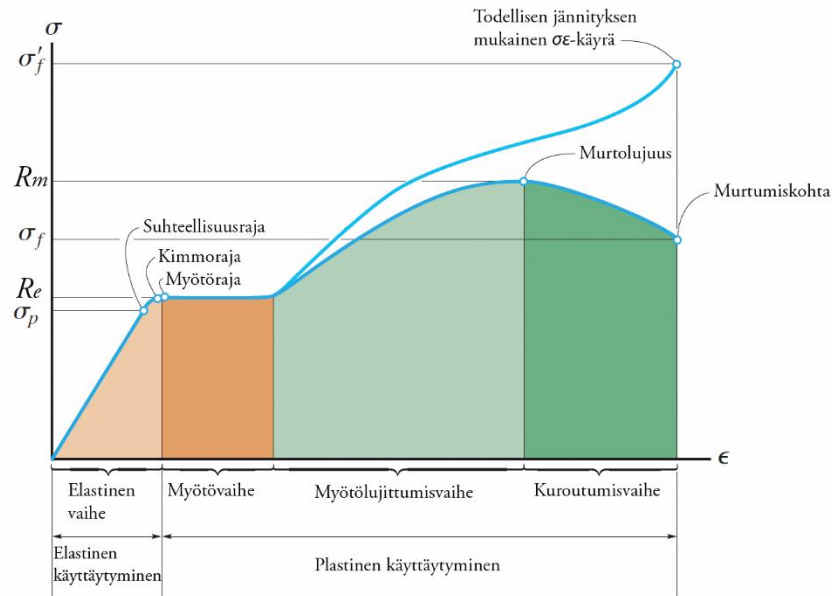
Kuvassa 6 on havainnollistettu yksiaksiaalisesta vetokokeesta saatu tyypillinen jännitys-venymäkäyrä. Aluksi jännitys on suoraan verrannollinen venymään, materiaalin suhteellisuusrajaan σ_p asti. Tällöin materiaali käyttäytyy täysin kimmoisesti eli sauvassa tapahtuvat venymät palautuvat täydellisesti alkuperäisiin tiloihin kuormituksen poistuttua. Tällöin materiaalin sanotaan olevan lineaarisesti kimmoista. Jännitys voi kuitenkin kasvaa vielä materiaalin kimmorajaan E asti, jos materiaali käyttäytyy kimmoisesti. Tässä vaiheessa materiaalin jännitys-venymäkäyrä on muodoltaan suoraviivainen, jolloin jännityksen ja venymän välinen yhteys voidaan esittää Hooken lain (5) avulla, missä suoran kulmakerroin on materiaalin kimmokerroin E . Kimmokerroin kuvaa materiaalin jäykkyyttä tarkasteltavassa materiaaalipisteessä. Kimmokertoimen suuruus on materiaalikohtainen. [6, 10, 13, 14, 15, 16]

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5)$$

Jännityksen ylittäessä materiaalin kimmorajan, koesauvaan jää pysyvä venymä kuormituksen poistamisen jälkeen eli materiaaliin on muodostunut plastista muodonmuutosta. Venymän kasvaessa edelleen, jännitys saavuttaa materiaalin myötörajan R_e , jonka jälkeen venymä jatkaa kasvamistaan tarvittavan voiman kuitenkin lisääntymättä. Tätä aluetta kutsutaan materiaalin myötövaiheeksi. Myötövaiheen ylittämisen jälkeen tarvittava nimellisjännitys alkaa jälleen kasvamaan venymän kasvaessa. Tätä vaihetta kutsutaan materiaalin myötölujittumisvaiheeksi. Myötölujittumisvaiheessa materiaali myötölujittuu tasaisesti plastisen muodonmuutoksen seurauksena, jolloin lisävenytykseen tarvittavan jännityksen määrä kasvaa. Myötölujittuminen siis vastustaa materiaalissa tapahtuvaa plastista muodonmuutosta. Koesauva venyy niin pitkään, kuin tämä myötölujittuminen pystyy kompensoimaan koesauvan ohenemisen vaikutuksen. [6, 10, 13, 14, 15, 16]

Lopulta jännityksen kasvaessa liian suureksi koesauvaan muodostuu paikallinen kurouma, jolloin vetokokeessa on myös saavutettu materiaalin murtolujuus R_m , joka vastaa nimellisjännityksen suurinta arvoa. Tässä kohdassa koesauvaan muodostuu myös ensimmäinen särö, jolloin koesauvassa tapahtuvat muodonmuutokset kohdistuvat enää pienelle kurouma-alueelle. Kun materiaali on saavuttanut sille ominaisen murtolujuuden, materiaali alkaa kuroutumaan yleensä koesauvan kavennetulta alueelta. Tämän jälkeen venymän kasvaessa edelleen, koesauvaan vaikuttava normaalivoima pienenee, kunnes saavutetaan materiaalin murtumiskohta, jossa materiaali murtuu. Kuroutumisvaiheen palautumatonta venymää kutsutaan murtovenymäksi ϵ_u . [6, 10, 13, 14, 16]

Kuvassa 6 on esitetty edellä mainitut vaiheet ja erotettu ne alueet, joissa materiaalin käyttäytyminen on kimmoista sekä plastista.

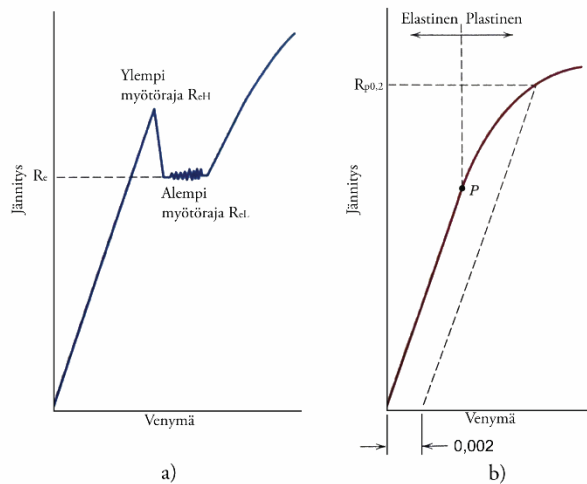


Kuva 6. Kuvassa on esitetty materiaalin jännitys-venymäkäyrä. Jännitys-venymäkäyrästä nähdään materiaalin käyttäytyminen kuormituksen alaisena yksiakselialaisen vetokokeen aikana. Kuvaajasta nähdään esimerkiksi, milloin materiaali alkaa myötämään ja milloin se murtuu. [16]

Aikaisemmin murtolujuutta R_m on käytetty lähes yksinomaan perusteena materiaalin lujuuden luokitteluun, mutta tämä ei kuitenkaan ole järkevää sillä, kun jännitys on saavuttanut murtolujuutta vastaavan arvon, koesauvaan on ehtinyt muodostumaan pysyvää venymää. Mikäli materiaaliin ei ole tarkoitus saada pysyvää venymää, on pysyttävä kimmoisella alueella, jota rajoittaa myötöjännitystä vastaava kimmoraja. Kimmorajan tarkka määrittäminen on kuitenkin kokeellisesti hankalaa, minkä vuoksi kimmoksen ja plastisen alueen erottamiseen käytetään yleisesti myötörajaa. [6, 10, 13, 14]

Kuvassa 7a on esitetty tavallisen jännitys-venymäkäyrän myötörajan määrittäminen. Materiaalin ylempi myötöraja R_{eH} on se jännityksen arvo, millä myötäminen alkaa ja alempi myötöraja R_{eL} määrittää taas pienimmän myötöalueella esiintyvän jännityksen. Joillakin materiaaleilla, kuten korkean lujuusluokan omaavilla teräslaaduilla, ei kuitenkaan ole havaittavissa selkeää myötörajaa, vaikka niiden jännitys-venymäkäyrässä onkin havaittavissa derivaatan epäjatkuvuuskohta, kuten kuvassa 7b on esitetty. Tällöin on käytettävä helpommin tunnistettavaa 0,2-rajaa ($R_{p0,2}$), jolla tarkoitetaan sitä jännityksen arvoa, jolla materiaaliin saadaan 0,2 %:n pysyvä venymä. Kyseinen 0,2-raja määritetään sovittamalla jännitys-venymäkäyrän suoran osan suuntainen tangentti materiaalin 0,002 mm/mm:n venymän kohdalle. 0,2-rajan arvo on piirretyn tangentin ja

jännitysvenymäkäyrän leikkauspistettä vastaava jännitys, kuten kuvassa 7b on esitetty. [6, 10, 13, 14] Mikäli materiaalia halutaan leikata, on sitä kuormitettava sen myötörajaa korkeammalla jännityksellä.



Kuva 7. Kuvassa on esitetty materiaalin myötörajan määrittäminen. Kohdassa a) on esitetty myötörajan määrittäminen ylemmän- ja alemman myötörajan perusteella. Kohta b) esittää materiaalin 0,2%-rajan ($R_{p0,2}$) määrittämistä. [6]

3.3 Materiaalin käyttäytymistä kuvaavat materiaalmallit

Ohutlevyjen muovattavuus määräytyy materiaalin mekaanisista ominaisuuksista, jotka riippuvat materiaalin valmistushistorian määrästä mikrorakenteesta ja koostumuksesta. Ohutlevyjen muovausta on mahdollista mallintaa numeerisesti elementtimenetelmän avulla, johon palataan tarkemmin luvussa 8. Jotta materiaalin käyttäytymistä kuormituksen alaisena on mahdollista ennustaa laskennallisesti, tarvitaan avuksi materiaalin käyttäytymistä kuvaavia yksinkertaistettuja materiaalmalleja. Materiaalimalliin tarvittavat materiaalin mekaaniset ominaisuudet, kuten lujuus, sitkeys ja jäykkyys, saadaan yleensä määritettyä yksiaksaalisella vetokokeella. [19]

Useimmiten materiaalmalleissa materiaalin oletetaan olevan jatkuvaa ja materiaalin yksittäisiä kiteitä tai niiden sisältämiä atomeja ei oteta huomioon. Tällöin puhutaan niin sanotuista konstitutiivisista malleista. Konstitutiivisten mallien avulla voidaan kuvata materiaalin muodonmuutoksen käyttäytymistä jännityksen alaisena. Mallit jaetaan, materiaalista riippuen, ajasta riippumattomiin ja ajasta riippuviin materiaaleihin. Ajasta riippumattomat materiaalit jaetaan syntyvän muodonmuutoksen perusteella jäykkiin,

kimmoisiin, plastisiin ja kimmoplastisiin (elastisplastinen) materiaaleihin. Nämä eroavat toisistaan siten, että jäykässä materiaalissa ei tapahdu lainkaan muodonmuutoksia, kimmoisessa materiaalissa muodonmuutokset ovat palautuvia, plastisissa materiaaleissa muodonmuutokset ovat palautumattomia ja kimmoplastisissa materiaaleissa muodonmuutokset palautuvat vain osittain. Ajasta riippuvat materiaalit jaetaan viskoelastisiin ja viskoplastisiin materiaaleihin. Ajasta riippuvat mallit soveltuvat käytettäväksi muun muassa muoveille, puulle sekä metalleille korkeissa lämpötiloissa. Tässä työssä keskitytään ainoastaan ajasta riippumattomiin malleihin, eikä näin ollen ajasta riippuvaisia malleja käsitellä. [14]

3.3.1 Materiaalin kimmoisen alueen tarkastelu

Metallien käyttäytyminen on kimmoista materiaalin myötörajaan R_e asti, jonka jälkeen siinä alkaa tapahtumaan plastista muodonmuutosta. Kimmoista muodonmuutosta voidaan kuvata yksinkertaisesti Hooken lain (5) avulla, missä jännityksen ja venymän välillä oletetaan olevan lineaarinen riippuvuus. Mikäli materiaaliominaisuudet oletetaan isotrooppisiksi eli suunnasta riippumattomiksi, materiaalin kimmoisen käyttäytymisen kuvaamiseen tarvitaan ainoastaan kaksi materiaalisuureta, jotka ovat kimmokerroin E ja Poissonin luku ν . [6, 13, 19] Venytetyssä tai puristetussa sauvassa tapahtuu pituussuuntaisen venymän lisäksi myös kutistumista tai laajenemista sauvan poikittaissuunnassa. Kun nämä venymät ovat riittävän pieniä, niin poikittaissuuntaisen venymän ε_{\perp} suhde pitkittäissuuntaiseen venymään ε on negatiivinen vakio, jonka vastalukua ν kutsutaan Poissonin luvuksi (6). Poissonin luku on materiaalikohtainen ja se on määritettävä kokeellisesti. [6, 13, 14, 18]

$$\nu = -\left(\frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon}\right) \quad (6)$$

Mikäli materiaalissa on yksiakselialinen normaalijännitystila (esimerkiksi σ_x), sen myötäminen noudattaa jännitys-venymäkäyrän myötörajan arvoa. Jos jännitystila on taas moniakselialinen $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$, jännitys-venymäkäyrästä ei nähdä materiaalin myötämisen alkukohtaa, sillä Poissonin luvusta johtuen myös materiaalin venymätila on aina moniakselialinen $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$. Tällöin on otettava käyttöön kustakin venymä- tai jännitystermistä riippuva funktio, joka kuvaa moniakselialista tilaa yhdellä arvolla. Tämän jälkeen saatua arvoa käytetään yksiakselialisen jännitysvenymäkäyrän kanssa

ilmaisemaan materiaalin rasiustilaa. [15, 18] Tästä johtuen materiaalien plastisen alueen epälineaarista käyttäytymistä mallinnettaessa tarvitaan avuksi myötöehto, jolla arvioidaan myötämisen alkupiste. Seuraavaksi esitellään yleisimmin käytössä olevat, ajasta riippumattomat, materiaalin plastista käyttäytymistä kuvaavat myötöehdot. [14, 15, 18]

3.3.2 Materiaalin myötöehdot

Materiaalin myötäminen aiheutuu dislokaatioiden aiheuttamasta atomien välisestä liukumisesta. Myötöehdolla määritetään se jännitystila, jossa plastinen muodonmuutos alkaa ja materiaalin käyttäytyminen muuttuu lineaarisesta epälineaariseksi. Yksiaksiaalisessa vetokokeessa myötöehtona toimii materiaalin mitattavissa oleva myötöraja R_e . Moniaksiaalisessa tapauksessa ei taas voida määrittää tiettyä jännityksen arvoa, jonka ylittämisen jälkeen kappale alkaa myötää. Tästä johtuen moniaksiaalisessa tapauksessa on määritettävä hypoteesi, joka ilmoittaa kappaleen myötämisen missä tahansa jännitystilassa. [14, 18]

Sitkeille materiaaleille yleisimmät myötöehdot ovat Trescan hypoteesi, joka tunnetaan myös maksimileikkausjännityshypoteesina, sekä von Misesin malli, joka tunnetaan myös muodonvääristymisenergiatiheyshypoteesina. [14, 15] Mikäli materiaali on isotrooppista eli kaikkiin suuntiin samanlaista, myötöehdot ovat koordinaatistosta riippumattomia, jolloin ne voidaan ilmaista jännitysinvarianttien funktiona. [15]

Trescan hypoteesin mukaan materiaali myötää sellaisessa pisteessä, jossa jännitystilän suurin leikkausjännitys saavuttaa materiaalin leikkausmyötörajan eli leikkausmurtolujuuden. [14] Trescan myötöehto on esitetty yhtälössä (7), jossa σ_{vert} on vertailujännitys ja $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ovat pääjännityksiä. [14, 15]

$$\sigma_{vert} = \max(|\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|, |\sigma_1 - \sigma_2|) \quad (7)$$

Materiaalia kuormitettaessa kimmoiseen materiaaliin varastoituu energiaa kimmoenergian muodossa. Osa tästä energiasta liittyy tilavuuden muuttamiseen, lopun kuluessa muodon vääristämiseen. Von Misesin myötöehdon mukaan materiaali myötää tai murtuu sellaisessa pisteessä, jossa sen vääristymisenergiatiheys saavuttaa materiaalille tai vauriotyypille kriittisen arvon. Muodonvääristymisenergiatiheys saadaan laskettua

vähentämällä kimmoenergiasta (yhtälö 8) hydrostaattisen jännityksen tekemä työ (yhtälö 9). Yhtälöissä E on materiaalin kimmokerroin, V on tilavuus, G on liukukerroin, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ovat avaruuskoordinaatiston akselien suuntaiset jännitykset ja $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ ovat leikkausjännitykset xy-, yz- ja xz -tasossa. [14]

$$U = \frac{1}{2E}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) - \frac{V}{E}(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) + \frac{1}{2G}(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \quad (9)$$

Kun tämä muodonvääristymisenergiatiheys merkitään materiaalin myötämishetkellä samaksi moniaksiaalisessa ja yksiaksiaalisessa vetokokeessa, saadaan määritettyä von Misesin myötöehto (yhtälö 10). Yhtälössä σ_m on aksiaalikoikeesta saatu materiaalin myötölujuus. [14, 15]

$$\sigma_m^2 = \frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (10)$$

Pääjännityskoordinaatistossa, jossa $\sigma_x = \sigma_1, \sigma_y = \sigma_2, \sigma_z = \sigma_3$ ja $\tau_{ij} = 0$, von Misesin myötöehto saadaan yhtälön (11) mukaiseen muotoon. [14, 15]

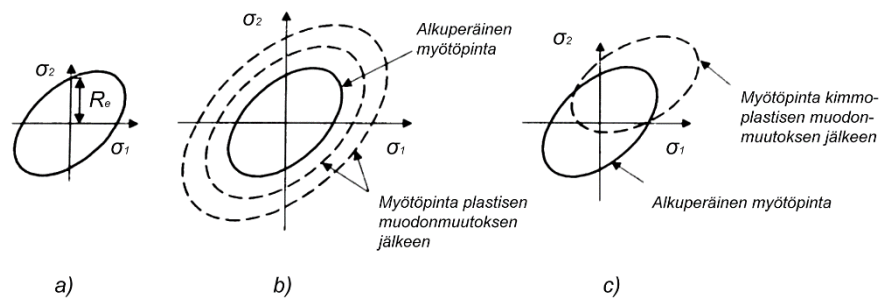
$$\sigma_m^2 = \frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (11)$$

Käytännön laskujen kannalta von Misesin myötöehto voidaan ilmoittaa niin sanotun vertailujännityksen σ_{vert} avulla, jolloin von Misesin myötöehto saadaan yksinkertaistettua seuraavaan muotoon (12).

$$\sigma_{vert} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (12)$$

Mikäli Trescan tai von Misesin myötöehto on laskettu vertailujännitys σ_{vert} on yhtä suuri kuin materiaalin myötölujuus yksiaksiaalisessa vedossa, materiaali alkaa myötää. Von Misesin myötöehto vastaa hieman tarkemmin kokeilla määritettyjä tuloksia Trescan myötöehtoon verrattuna, minkä vuoksi se onkin yleisemmin käytössä oleva hypoteesi. [14, 15, 20]

Materiaalin myötöpinta ilmaisee, milloin syntynyt muodonmuutos on kimmoista ja milloin kimmoplastista. Kimmoplastisen materiaalin muodonmuutokset palautuvat vain osittain. [14, 18] Mikäli materiaalipisteen jännitystila sijaitsee myötöpinnan sisäpuolella, muodonmuutos on luonteeltaan kimmoista. Kun jännitystila saavuttaa myötöpinnan, muodonmuutos muuttuu tällöin kimmoplastiseksi. Jännitystila ei kuitenkaan pysty siirtymään myötöpinnan ulkopuolelle, sillä jännitystilän pyrkiessä ulos myötöpinnan sisältä, myötöpinta joko kasvaa, jolloin tapahtuu isotrooppinen myötölujittuminen, tai siirtyy, jolloin tapahtuu kineettinen myötölujittuminen materiaalin myötölujittumisen aikana. Myötöpinnan muodostavat esimerkiksi von Misesin myötöehdon (15) nollakohdat. Kuvassa 8 on havainnollistettu von Misesin myötöpinnan muutokset. Von Misesin myötöpinnan alkutila on esitetty kohdassa a), kun taas kohta b) kuvaa myötöpintaa isotrooppisen myötölujittumisen jälkeen, ja kohta c) kuvaa myötöpintaa kinemaattisen myötölujittumisen jälkeen. [18]



Kuva 8. Kuvassa on esitetty materiaalin myötöpinta, josta nähdään milloin materiaalin muodonmuutos on kimmoista ja milloin kimmoplastista. Kohdassa a) on esitetty von Misesin myötöpinta ennen myötölujittumista, kohdassa b) von Misesin myötöpinta isotrooppisen myötölujittumisen jälkeen ja kohdassa c) von Misesin myötöpinta kinemaattisen myötölujittumisen jälkeen. [18]

3.4 Materiaalin myötölujittuminen

Materiaalia simuloitaessa on myötämisen ohella tiedettävä myös, miten materiaali lujittuu muovauksen aikana. Myötö- eli muokkauslujittumisella, tarkoitetaan ilmiötä, jossa sitkeiden metallien kovuus ja lujuus kasvavat plastisen muodonmuutoksen myötä. Tämä on nähtävissä esimerkiksi materiaalin jännitys-venymäkäyrän (kuva 6) myötölujittumisvaiheesta. Myötölujittumisen aikana materiaalin lujuus ja myötöraja kasvavat, mutta samalla taas materiaalin sitkeys ja muodonmuutoskyky heikkenevät. Monet sitkeät metallit myötölujittuvat jo huoneenlämmössä, kun ne kuormitetaan plastiselle alueelle. Kun kuormitus poistetaan, kimmoiset venymät palautuvat

alkuperäiseen tilaansa, mutta plastiset venymät eivät. Tämä nähdään materiaalin myötörajan nousuna. [6, 16]

Materiaalin myötölujittumisaste $\%CW$ voidaan määrittää yhtälön (13) avulla, jossa A_0 on materiaalin alkuperäinen poikkipinta-ala ja A_d on deformatuneen materiaalin poikkipinta-ala. [6]

$$\%CW = \left(A_0 - \frac{A_d}{A_0} \right) \times 100 \quad (13)$$

Materiaalien lujittuminen on seurausta dislokaatioiden perättäisestä liukumisesta, mihin myös plastinen muodonmuutos perustuu. Yksinkertaistetusti myötölujittuminen perustuu dislokaatioiden liukumisen vaikeuttamiseen. Muokkaaminen aiheuttaa materiaaliin dislokaatiometsiä ja -solmuja, jotka kasvattavat materiaalin dislokaatiotiheyttä. Tällöin dislokaatioiden välinen etäisyys pienenee, jolloin ne asettuvat lähemmäs toisiaan. Lähemmäs asettuneiden dislokaatioiden välille muodostuu vastustavia jännitystiloja, jolloin dislokaatiot pyrkivät vastustamaan muiden dislokaatioiden liukumista. [6, 13] Tämä materiaalin muodonmuutoksen vastustaminen nostaa siten materiaalin kovuutta ja lujuutta.

Myötölujittumisilmiötä käytetään usein hyödyksi metallien valmistuksessa parantamaan metallien mekaanisia ominaisuuksia, kuten lujuutta, mutta sen vaikutus voidaan myös poistaa erilaisten lämpökäsittelyjen avulla, joihin tässä työssä ei perehdytä tarkemmin. [6, 10, 21] Tarvittavien lämpökäsittelyjen toimintaperiaatteet on esitetty esimerkiksi Asthana et al. teoksessa *Materials Science in Manufacturing*. [21]

Myötölujittumiselle on kehitetty useita erilaisia materiaalimalleja, jotka huomioivat materiaalin lujittumisen eri jännitystiloissa. Yleisimmin käytössä oleva myötölujittumista kuvaava sovite on Hollomonin yhtälö (14), jossa $\bar{\sigma}$ on todellinen jännitys, K on materiaalin lujuuskerroin, $\bar{\epsilon}$ on todellinen venymä ja n on materiaalin myötölujittumiseksponentti. Hollomonin yhtälön parametrit saadaan määritettyä yksiaksiaalisesta vetokokeesta. [6, 19]

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (14)$$

Myötölujittumiseksponentti n kertoo, kuinka paljon materiaali pystyy venymään ennen sen kuroutumista. Kyseistä arvoa käytetäänkin yleisesti materiaalin venytysmuovattavuuden mittana esimerkiksi syvävedossa. Mikäli myötölujittumiseksponentti on yksi, materiaali on kimmoista, jolloin se myötölujittuu voimakkaasti. Yleisesti voidaan todeta, että mitä suurempi materiaalin myötölujittumiseksponentti on, sitä ohuemmaksi ohutlevyä voidaan venyttää. Myötölujittumiseksponentti ja materiaalin lujuuskerroin saadaan määritettyä suoraan materiaalin vetokoedatasta. [6, 11, 13, 19, 21]

3.5 Materiaalien vauriomallit

Materiaalien vaurioitumista voidaan tutkia suhteellisen tarkasti elementtimenetelmän avulla. Kehitetyillä vauriomalleilla pyritään kuvaamaan materiaalin mikrorakenteessa tapahtuvien palautumattomien vaurioprosessien, kuten mikrosäröjen, kasvua makroskooppiseksi säröksi. [18]

Vauriomallit ovat materiaalin dynaamista käyttäytymistä kuvaavia yhtälöitä, joilla kuvataan materiaalin muodonmuutoskäyttäytymistä siten, että huomioidaan jännityksen ja venymän lisäksi materiaalin aikaisempi kuormitushistoria. Kun funktiossa saavutetaan vaurioitumisen kriittinen arvo, materiaali murtuu. Vauriomallit riippuvat materiaalille erikseen määritetyistä materiaaliparametreista. Malleja hyödynnettäessä on huomioitava, että suurin epätarkkuus johtuu usein valituista lähtöarvoista, minkä vuoksi mallien materiaaliparametrit on määritettävä mahdollisimman tarkasti. Materiaaliparametrit voidaan usein määrittää toisistaan riippumattomasti, mikä osaltaan helpottaa niiden määrittämistä. [22]

Metallien vauriokäyttäytymisen tarkasteluun soveltuvat mainiosti muun muassa Johnson-Cookin ja Cockcroft-Lathamien vauriomallit.

3.5.1 Johnson-Cook-malli

Johnson-Cookin malli, joka on esitetty yhtälössä (15), on laajasti käytössä oleva konstitutiivinen materiaalimalli. Mallia käytetään yleisesti sellaisissa dynamiikan ongelmissa, joissa esiintyy suuria muodonmuutoksia ja lämpötilavaihteluita, minkä vuoksi se soveltuu hyvin materiaalin leikkausprosessin tai lastuavan työstön mallintamiseen. [23, 24, 25, 26, 27]

Mikäli materiaalin myötöehtona käytetään von Misesin myötöehtoa ja materiaalin myötölujittumisen oletetaan olevan isotrooppista, materiaalin myötölujuus noudattaa Johnson-Cookin yhtälöä. [11] Yhtälössä oletetaan, että myötölujuuden kulmakerroin on riippumaton materiaalin myötölujittumisesta, muodonmuutosnopeuden herkkyydestä sekä termisestä pehmenemisestä. [23, 24, 26]

$$\sigma = [A + B\bar{\epsilon}^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right] \quad (15)$$

Yhtälössä σ esittää materiaalin myötölujuutta, A on materiaalin alkuperäinen myötölujuus huoneenlämmössä, B on myötölujittumistermi ja C on dimensioton, muodonmuutosnopeudesta riippuva, lujittumista kuvaava vakio. $\bar{\epsilon}$ kuvaa plastista muodonmuutosta, $\dot{\bar{\epsilon}}$ kuvaa plastisen muodonmuutoksen nopeutta ja $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ kuvaa referenssimuodonmuutosnopeutta. Eksponentit n ja m ovat myötölujittumisen ja termisen pehmenemisen suuruutta kuvaavia arvoja, T on työkappaleen lämpötila ($^{\circ}\text{C}$), T_0 on huoneenlämpötila ($^{\circ}\text{C}$) ja T_{melt} on materiaalin sulamispiste ($^{\circ}\text{C}$). [23, 24, 25, 26]

Johnson-Cook-malli sovitetaan koearvoihin, muokkaamalla mallin parametreja siten, että mallin antamien jännityksien ja todellisten jännityksien erotuksen neliöiden summaa minimoidaan otosten ylitse. [27]

3.5.2 Cockroft-Latham-vauriomalli

Cockroft-Latham vauriomallin (yhtälö 16) mukaan sitkeä materiaali murtuu silloin, kun ylitetään materiaalin vaurioitumiseen tarvittava kriittinen arvo C . Yhtälössä σ on materiaalin suurin vetojännitys ja C on materiaalin kriittinen arvo, joka on materiaalivakio, ϵ^f on murtovenymä ja ϵ_p on vastaava plastinen venymä.

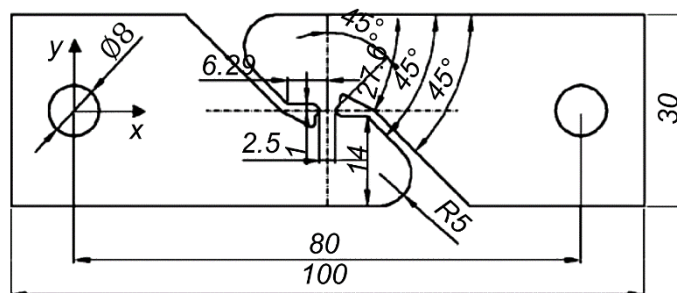
$$C = \int_0^{\epsilon^f} \sigma d\epsilon_p \quad (16)$$

Mikäli pääjännitykset ovat pienempiä tai yhtä suuria kuin nolla, materiaali ei vaurioidu. Vauriomallin mukaan sitkeän materiaalin murtuminen riippuu jännityksen ja plastisen venymän yhteisvaikutuksesta. [22]

3.6 Leikkausmurtokoe tasavenymätilassa

Yksiaksaalinen vetokoe on käytetyin kokeellinen menetelmä, jolla voidaan tarkastella kimmoplastisen materiaalin käyttäytymistä. Menetelmässä on kuitenkin ongelmallista se, että sitkeä murtuminen muodostuu vasta diffuusikuroutuman tai paikallisen kuroutuman jälkeen, jolloin suurten plastisten muodonmuutoksien tarkka mittaaminen murtumaan asti on hankalaa. Leikkausmurtokoe soveltuu niin kokeellisesti kuin numeerisestikin, materiaalin muodonmuutosten tarkasteluun sekä materiaalin murtoehtojen määrittämiseen. Menetelmän avulla voidaan tarkastella ohutlevyn käyttäytymistä suurten plastisten muodonmuutosten ja monimutkaisten kuormitusten alaisena. Yksinkertaisen leikkauksen määrittämisessä yksi suunnista pysyy vakiona muiden liikkuessa sen suhteen, kun taas puhtaan leikkauksen kohdalla suurimman kuormituksen ja venymän suunta pysyy vakiona. [28]

Vaikka leikkausmurtokokeet ovatkin varsin laajasti käytettyjä, koesauvan geometrialle ei ole olemassa erillistä standardia. Tästä johtuen koesauvojen geometriat on usein määritettävä koemateriaalille erikseen. Koesauvat ovat suhteellisen helppo valmistaa ja ne ovat muodoltaan tavallisen vetokoesauvan mukaisesti suorakulmaisia. Erona tavalliseen vetokoesauvaan on, että leikkausmurtokokeen koesauvan kavennettu osa on muodoltaan hieman monimutkaisempi. Kuvassa 9 on esitetty Tarigopula et al. [28] tutkimuksessa käytetyn koesauvan geometria, jossa tarkasteltavan leikkausalueen pituus on 2,5 mm. [28]



Kuva 9. Tarigopula et al. leikkausmurtokokeessa käytetyn koesauvan geometria. Koesauvan leikkausalueen pituus on 2,5mm. [28]

Tavallisesti leikkausmurtokoe suoritetaan perinteisellä vetokoelaitteistolla, jossa koesauvan kiinnitys tapahtuu erillisten kiinnitystappien avulla. Kiinnitystappien ansiosta koesauva pystyy liikkumaan vapaasti vetokokeen aikana, jolloin materiaalin murtumis-

ja muodonmuutuskäyttäytymistä voidaan tarkastella mahdollisimman todenmukaisesti. Materiaalin muodonmuutokset mitataan vetokokeen aikana digitaalisen kuvantamismenetelmän (*Digital Image Correlation, DIC*) avulla. Digitaalinen kuvantamismenetelmä on ei-kosketuksissa oleva optinen menetelmä, jolla pystytään mittaamaan materiaalissa tapahtuvia siirtymiä ja venymiä koessaiuvan tasaiselta alueelta materiaalin plastisen muodonmuutoksen aikana. Menetelmässä verrataan koessaiuvassa olevan satunnaisen kuvioinnin harmaan sävyjen muutoksia alkuperäisen näytekalpaleen kuviointiin tietokoneohjelmiston avulla. [28]

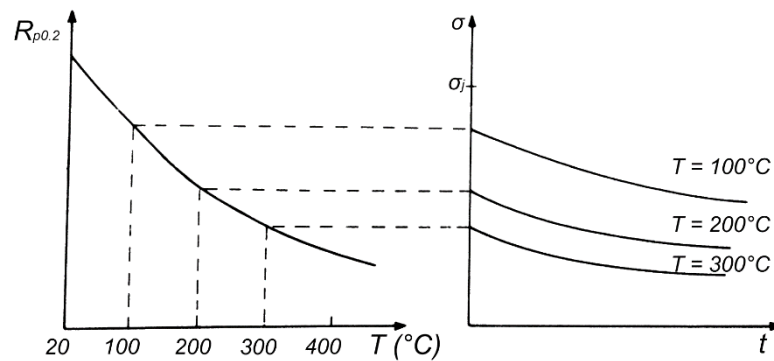
3.7 Materiaalin jäännösjännitykset

Materiaalia muovattaessa ei koskaan saavuteta sellaista tilannetta, jossa plastinen muodonmuutos olisi koko kalpaleessa täysin homogeenista. Kun sitkeää materiaalia kylmämuokataan siten, että sen myötölujuus ylittyy, materiaali venyy plastisesti. Kun ulkoinen jännitys poistetaan, kimmainen venymä palautuu, mutta syntynyt plastinen venymä ei palaudu. Tällöin materiaalin jää ulkoisen voiman poistuttua sisäisiä jännityksiä, joita kutsutaan jäännösjännityksiksi. Jäännösjännitykset aiheutuvat silloin, kun kalpaleen eri osissa tapahtuu käsittelyn aikana erisuuruisia plastisia muodonmuutoksia. [6, 10, 20, 29] Jäännösjännitykset saattavat olla suuruudeltaan jopa materiaalin myötölujuuden suuruisia ja niillä on merkittävä vaikutus materiaalin ominaisuuksiin. [10, 30, 31] Jäännösjännitykset usein heikentävät materiaalin väsymiskestävyyttä, jolloin niiden olemassaolo saattaa edesauttaa materiaalin murtumista. [29, 31]

Jäännösjännitykset voivat olla tuotteen kannalta joko hyödyllisiä tai haitallisia, riippuen jännityksen luonteesta. Yleensä materiaalin pinnalla vallitseva puristusjännitys on hyödyllinen, sillä se lisää materiaalin väsymislujuutta, joka suojaa materiaalia muun muassa väsymismurtumiselta ja jännityskorroosiolta. Materiaalin pinnassa oleva vetojännitys on yleensä haitallinen, mikä ilmenee usein murtumisena. Lisäksi pinnassa oleva vetojännitys altistaa materiaalia jännityskorroosiolle. [10, 29, 30, 31]

Jäännösjännitykset voidaan poistaa esimerkiksi myöstöhehkutuksen avulla. Myöstöhehkutuksessa tapahtuva jäännösjännityksien laukeaminen perustuu myötölujuuden lämpötilariippuvuuteen. Kuvan 10 tapauksessa, jäännösjännitys σ_j on

aluksi lähes myötölujuuden $R_{p0,2}$ suuruinen. Materiaalia kuumennettaessa sen myötölujuus laskee, jolloin myös kappaleen jäännösjännitykset alenevat kyseistä hehkutuslämpötilaa vastaavan myötöjännityksen arvoon. [6, 10]



Kuva 10. Jäännösjännitysten laukaiseminen myöstöhehkutuksen avulla. Metallia kuumennettaessa sen myötölujuus laskee, jolloin jäännösjännitykset aiheuttavat plastista muodonmuutosta, jäännösjännitysten alentuessa samalla kyseistä hehkutuslämpötilaa vastaavaan myötöjännityksen arvoon. [10]

Jäännösjännityksiä voidaan myös laukaista mekaanisesti. Jos esimerkiksi tankoa, jonka pinnassa on myötölujuuden suuruinen vetojännitys ja sisustassa puristusjännitys, vedetään, tapahtuu tangon pinnassa plastista venymistä, jolloin sisustan puristusjännitystila vähitellen heikkenee. Tankoa vedettäessä pinnan plastinen muodonmuutos muodostaa pintaan puristusjäännösjännitystilan ja vastaavasti sisustaan vetojäännösjännitystilan, jotka summattuna vetoa edeltäneen jännitystilan kanssa aiheuttavat jännityksettömän tangon. Kun ulkoinen kuorma poistetaan, jännitys koko tangossa palautuu lähes nollatasolle. [10]

3.7.1 Jäännösjännitysten mittaaminen

Jäännösjännityksiä voidaan mitata kahdella tavalla: suorilla eli ainetta rikkovilla menetelmillä tai epäsuorilla eli ainetta rikkomattomilla menetelmillä. Ensiksi mainituilla menetelmillä osa jäännösjännityksistä laukaistaan poistamalla ainetta, jolloin alkuperäinen jännitystila voidaan arvioida aiheutuneesta muodonmuutoksesta. Tällaisilla menetelmillä voidaan mitata ainoastaan jäännösjännitystilän makroskooppinen komponentti. Jälkimmäiset menetelmät taas perustuvat tiettyjen fysikaalisten suureiden tai ilmiöiden jännitystilariippuvuuteen. Näiden menetelmien avulla voidaan mitata sekä mikro- että makrojäännösjännityksiä. [10, 29, 30]

Porausmenetelmä on laajasti käytetty ainetta rikkova menetelmä. Menetelmässä kappaleen pintaan porataan reikä ja tämän reiän ympäristössä tapahtuvat muodonmuutokset mitataan esimerkiksi porauskohdan ympärille liimattujen venymäliuskojen avulla. Menetelmän suurimpana haittapuolena on se, että kappaleesta tulee käyttökelvoton, eikä näin ollen käyttöön tarkoitettua tuotetta voida mitata. Lisäksi näytteen valmistelu siten, ettei pintaan muodostu uusia jännityksiä tai muodonmuutoksia on hankalaa. [10, 29, 30] Toinen mahdollinen menetelmä on happokoe, jossa tutkittava kappale upotetaan rikkihappoliuokseen. Menetelmä perustuu siihen, että liuoksesta tunkeutuu kappaleeseen vetyä, joka yhdessä pinnassa olevien vetojännityksien kanssa aiheuttaa pinnan säröilyä. Tämä mahdollistaa vetojäännösjännityksien kvalitatiivisen tutkimisen. [10]

Uusin ainetta rikkovista menetelmistä lienee Contour-menetelmä, joka esiteltiin vuonna 2000 ja mainittiin kirjallisuudessa ensimmäistä kertaa vuonna 2001. Menetelmän on kehittänyt ja patentoinut amerikkalainen tutkimuslaboratorio ”Los Alamos National Laboratory”. Menetelmässä mitattava metallinäyte sahataan tarkasti kahteen osaan, esimerkiksi lankasahaamalla. Tämän jälkeen leikkauspinnoista mitataan lauenneiden jäännösjännitysten aiheuttamat muodonmuutokset ja lopulta näiden mittaustulosten pohjalta lasketaan jäännösjännitysten suuruus analysoimalla näytettä elementtimenetelmän avulla. [32]

Ainetta rikkomattomissa menetelmissä mitataan jäännösjännitysten aiheuttamia fysikaalisia muutoksia, kuten hilatasojen välisen etäisyyden tai äänen etenemisnopeuden

muutoksia. Jäännösjännityksiä voidaan mitata muun muassa röntgendiffraktiolla, ultraäänimenetelmillä tai magneettisilla menetelmillä. [10, 30] Tässä työssä esitellään edellä mainituista menetelmistä ainoastaan yleisimmin käytettävä röntgendiffraktio. Muita menetelmiä käsitellään muun muassa Withers et al. [30], Yelbay et al. [33] ja Kandil et al. [34] julkaisuissa.

Röntgendiffraktiomenetelmä perustuu siihen, että kiteisen materiaalin atomitasojen väliset etäisyydet muuttuvat lineaarisesti jännityksen vaikutuksesta. Kun metallin pintaan kohdistetaan röntgensäteilyä, säteet heijastuvat niistä atomitasoista, jotka täyttävät Braggin ehdon (17).

$$2d \sin \theta = \lambda \quad (17)$$

Kun käytetyn säteilyn aallonpituus λ tunnetaan, tasoetäisyys d saadaan laskettua mittaamalla diffraktiokulmaa 2θ . Metallissa olevat mikro- ja makrojäännösjännitykset vaikuttavat eri tavoin heijastuvaan intensiteettiin siten, että mikrojännitykset leventävät syntyvää diffraktioviivaa, kun taas makrojännitykset siirtävät sitä. Jännitykset mitataan yleensä diffraktometrin avulla, jossa röntgensäteet rekisteröidään detektorin avulla. Röntgenmenetelmän avulla saadaan mitattua ohuen, noin 0,02 mm paksun pintakerroksen jännitystila, jossa usein sijaitsevatkin suurimmat ja myös haitallisimmat jännitykset. [6, 10, 30]

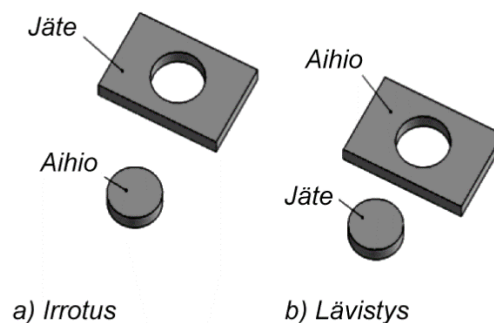
4. Meistotekniikka

Meistotekniikka käsittää ne työvaiheet, joita käytetään ohutlevyn (paksuus alle 3 mm) leikkaamiseen ja muovaamiseen erilaisien puristimien ja työkalujen avulla. [35, 36] Leikkauksella tarkoitetaan yleisesti ohutlevyn leikkaamista, lävistämistä, katkaisemista, irrottamista, viiltämistä tai jälkileikkaamista. Muovaavilla meistomenetelmillä tarkoitetaan taas muovausmeistoa, leimausmeistoa, vetämistä sekä pursotusta. Meistotekniikka soveltuu erinomaisesti sarjatuotantoon suurien kappalemäärien ja tarkkojen muotojen valmistamiseen [35, 36, 37] Reiän lävistämiseen tarvitaan vain noin kolmasosa siitä energiasta, joka tarvittaisiin esimerkiksi vastaavan reiän poraamiseen. [37]

Tässä luvussa tarkastellaan ohutlevyn leikkaamista meistotyökalun avulla, keskittyen ainoastaan leikkaimen toimintaan, sekä niihin tekijöihin, jotka vaikuttavat valmistettavan tuotteen leikkauspinnan laatuun. Tässä työssä ei käsitellä muovaavia meistomenetelmiä.

4.1 Meistoleikkain

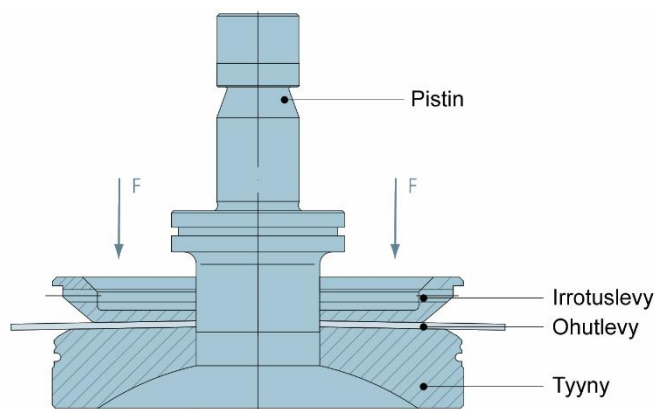
Leikkaaminen on yleisnimitys irrottamiselle, lävistämiselle ja muille leikkaustavoille. Irrottamisessa aihio, eli leikkaamalla muodostettu halutun muotoinen kappale, leikataan irti ohutlevystä eli rainasta. Lävistyksessä taas leikataan halutun muotoinen suljettu kappale aihioon. Jätteellä tarkoitetaan leikkauksessa muodostunutta osaa, jota ei ole tarkoitus käyttää tuotantoon. [35, 38] Kuvassa 11 on esitetty kaaviokuva irrottamisen ja lävistyksen erolle.



Kuva 11. Irrottamisen ja lävistämisen kaavioesitys. [38]

Meistotekniikan tärkeimmät työkalut ovat leikkain (lävistin), meisti ja vedin. Näistä työkaluista koostuvat pääosin myös monimutkaisemmatkin meistotyökalut. [35, 36] Tässä työssä tarkastellaan leikkauksesta aiheutuvien jännitysten suuruutta, kun ohutlevyä leikataan terävällä, puoliterävällä ja tylsällä pistimellä. Näin ollen ainoastaan leikkaimen toimintaperiaatteen tarkastelu on työn kannalta oleellista.

Meistotöiden tärkein työkalu on leikkain, jota yleensä käytetään epäkeskopuristimessa. Epäkeskopuristin on mekaaninen puristin, jossa työstön vaatima energia siirretään sähkömoottorin pyörittämästä vauhtipyörästä puskimeen, jolloin aikaansaadaan riittävän suuri puristusvoima halutun muotoisen kappaleen irrottamiseen ohutlevystä. [35] Kuvassa 12 on esitetty meistoleikkaimen pääkomponentit; pistin, tyyny ja irrotuslevy.



Kuva 12. Meistoleikkaimen osat: Pistin, irrotuslevy ja tyyny. [39]

Leikkausprosessissa leikattava ohutlevy asetetaan tyynyn pinnalle ja leikkautuminen tapahtuu pistimen työiskulla, kuten kuvassa 12 on esitetty. [35] Irrotuslevyn tehtävänä on irrottaa aihio pistimestä. Irrotuslevy voi toimia myös ohutlevyn pidättimenä leikkauksen aikana, mikäli käytettävä irrotuslevy on jousitettu. Jousitetun irrotuslevyn jousivoima saadaan laskettua yhtälön (18) mukaan, missä P on jousivoima, c on jousivakio ja f on venymä. [37] Irrotustyöhön tarvittava irrotusvoima aiheutuu pääosin pistimen ja tyynyn aukon välisestä kitkasta. Kitkavoima riippuu taas pistimen ja ohutlevymateriaalin välisestä kitkakertoimesta, sekä pistintä vastaan kohtisuorassa vaikuttavasta voimasta. [37, 40] Tavallisesti tarvittava irrotusvoima on noin 10 % leikkausvoimasta ja sitä voidaan pienentää esimerkiksi porrastamalla pistintä. [36, 37, 38]

$$P = c \times f \quad (18)$$

Meistotöissä käytetyimpiä leikkaustyökaluja ovat yksikköleikkain, jonoleikkain, täysleikkain ja monikkoleikkain. Yksikköleikkain suorittaa nimensä mukaisesti vain yhden leikkausvaiheen, jonoleikkaimeen sisältyy vähintään kaksi jonossa olevaa leikkausvaihetta ja täysleikkaimessa kaikki leikkausvaiheet suoritetaan samanaikaisesti. Monikkoleikkaimen avulla on mahdollista valmistaa useita kappaleita rinnakkain. [35, 37]

4.2 Pistin ja tyyny

Pistimen ja tyynyn geometrioilla ja mitoilla on merkittävä rooli leikkausprosessissa valmistetun kappaleen muotoihin. Tyynyn reiän mitat määrittävät leikattavan aihion muodon, kun taas pistimen mitat määräävät lävistettävän reiän suuruuden. Standardin SFS 5804 mukaan pistimen halkaisija ei kuitenkaan saa olla pienempi kuin leikattavan ohutlevyn paksuus. [35, 36, 41]

Yhtälössä 19 on esitetty laskukaava tyynyn minimiulkomitan määrittämiseen. Yhtälössä B on tyynyn minimileveys, b on leikattavan aukon suurin mitta B :n suunnassa ja H on tyynyn paksuus. [36, 37]

$$B = b + (3 \dots 4) \times H \quad (19)$$

Pyöreän pistimen halkaisija voidaan laskea yhtälön 20 avulla, missä D_{min} on pyöreän pistimen pienin halkaisija, s on leikattavan levyn paksuus ja R_m on leikattavan materiaalin murtolujuus. [36, 37]

$$D_{min} = s \times \sqrt[3]{\frac{R_m}{350}} \quad (20)$$

Vastaavasti neliskulmaisen pistimen halkaisija saadaan yhtälön 21 avulla, missä E_{min} on neliskulmaisen pistimen sivun pienin pituus. [37]

$$E_{min} = 0,8 \times s \times \sqrt[3]{\frac{R_m}{350}} \quad (21)$$

Pistimen pituus voidaan määrittää nurjahduksen perusteella yhtälön 22 avulla. Yhtälössä L_{max} on pistimen maksimipituus, d on pistimen halkaisija ja τ_b on kappaleen leikkausmurtolujuus. [36]

$$L_{max} = \sqrt{33400 \times \left(\frac{d^3}{\tau_b} \times s\right)} \quad (22)$$

Leikkausprosessissa leikattava ohutlevy asetetaan tyynyn pinnalle ja leikkautuminen tapahtuu pistimen työiskulla. [35] Jotta pistin pystyy irrottamaan ohutlevystä tyynyn muotoisen kappaleen, on pistimen tunkeuduttava hieman tyynyn sisään. Tämän tunkeutuman suuruus on yleisesti noin yksi kymmenesosa leikattavan ohutlevyn paksuudesta. [37] Tavallisesti tyynyn alareunaan tehdään hieman päästöä, eli sen alareuna hiotaan muutaman asteen kulmaan, jolloin helpotetaan kappaleen irtoamista leikkaustyökalusta. Useimmiten pistimen pää on tasainen, mutta sitä on mahdollista muotoilla tarvittavan lävistysvoiman pienentämiseksi. Pistin voidaan hioa hieman vinoksi, jolloin leikkausvoima jakaantuu pidemmälle pistimen iskulle ja näin ollen tarvittava maksimileikkausvoima saadaan pienemmäksi. Tällainen helpotukseksi kutsuttu menettely tehdään yleensä pistimelle, mutta se voidaan suorittaa myös tyynylle. [35, 36, 37, 38] Leikkausvoimaa voidaan myös pienentää porrastamalla pistintä. [36, 37, 38]

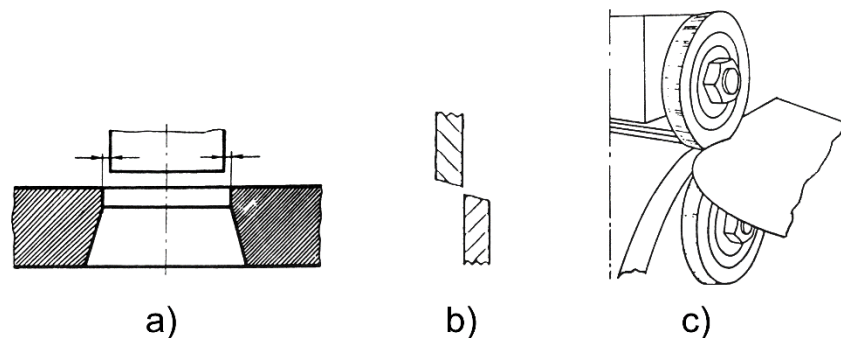
Tarkoissa työkaluissa on myös huomioitava työkalun kulumisen. Pistimen tunkeutuessa ohutlevyyn, tapahtuu siinä leikkauksukulusta. Leikkauksessa materiaali liukuu samanaikaisesti pitkin pistimen otsapintaa ja tyynyn yläpintaa kohti leikattavaa reunaa, mistä pääasiassa aiheutuu pistimen ja tyynyn kulumisen. Leikkaustyökalujen kulumisen kohdistuu kapealle alueelle, koska leikkausvoiman ja -välin vaikutuksesta syntyvä momentti taivuttaa työkappaletta. [40]

Yleensä pistin kuluu tyynyä nopeammin, minkä vuoksi pistimeltä vaaditaankin hyvää kovuutta, kulumiskestävyyttä ja sitkeyttä. [37] Pistimen kulumisen on yleensä kaksin- tai jopa kolminkertainen tyynyn kulumiseen verrattuna. Tämä johtuu siitä, että pistin joutuu kulkemaan leikattavan materiaalin lävitse kaksi kertaa, kun taas leike painuu tyynyn lävitse vain kerran. Tämän lisäksi pistimeen kohdistuu leikkauksen aikana värähtelevää liikettä, mikä kasvattaa vielä entuudestaan pistimen kulumista. [40] Tästä johtuen pistimen teroitusvaran tulee olla tyynyyn verrattuna hieman suurempi.

Leikkausprosessissa on myös huomioitava teroituksessa lyhentynyt pistin ja ohentunut tyyny, muuttamalla leikkauksen iskunpituutta leikkaustyökalujen teroituskertojen mukaan. [40] Pistimet ja tyyny valmistetaan yleensä kylmätyökaluteräksistä, kovametalleista tai pinnoitetuista pikateräksistä. [37, 40] Leikkaustyökalujen pinnoittaminen saattaa jopa kaksinkertaistaa leikkaimen kestojän pinnoittamattomaan työkaluun verrattuna. [38] Lisäksi pistimen ja tyynyn tulee olla rakenteeltaan riittävän tukevia, jotta ne kestävät leikkausvoimaan tarvittavan jännityksen. [37]

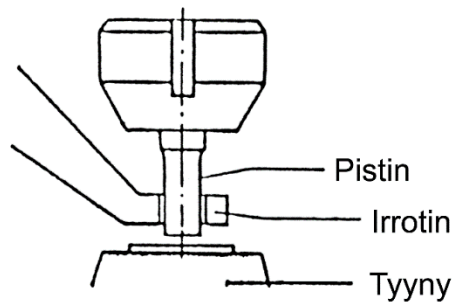
4.3 Ohutlevyn leikkaus ja lävistys

Materiaalia voidaan irrottaa rainasta joko suljettua tai avointa leikkauslinjaa pitkin. Suljettu leikkausviiva muodostetaan meistityökalussa vastakkain olevien leikkaavien särmien eli pistimen ja tyynyn avulla. Avoin leikkausviiva saadaan aikaiseksi, kun leikkaavat särmät muodostuvat joko kahdesta suorasta terästä tai kahdesta vastakkain pyörivästä leikkaavasta kiekosta. [37] Kuvassa 13 on esitetty suljetun ja avoimen leikkauslinjan toimintaperiaatteet.



Kuva 13. Erilaiset leikkausviivat. a) Leikkaus suljettua leikkausviivaa pitkin, pistimen ja tyynyn, avulla, b) leikkaus avointa leikkausviivaa pitkin ja c) leikkaus avointa leikkausviivaa pitkin pyörivien kiekkojen avulla. [37]

Suljetulla leikkausviivalla voidaan leikata erimuotoisia kappaleita joko lävistämällä tai irrottamalla. Avointa leikkausviivaa käytetään lähinnä suorien aineiden tai nauhojen leikkaamiseen. Kolmas leikkaamisvaihtoehto on nakertaminen, joka suoritetaan erikoispuristimessa. Nakertamisessa aihioon leikataan lyhyiden iskujen avulla useita, osittain toistensa päälle meneviä reikiä. Menetelmää käytetään esimerkiksi, kun on tarkoitus leikata reikiä ohutlevyn reunaan. Nakertaminen suoritetaan myös pistimen ja tyynyn avulla, kuten kuvassa 14 on esitetty. [37]

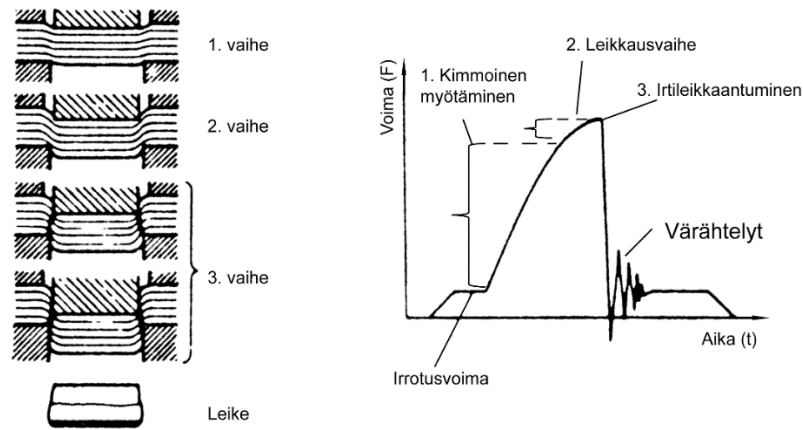


Kuva 14. Nakerrintyökalun rakenne. [37]

Kun Materiaalia lävistetään suljettua leikkausviivaa pitkin, pistin valmistetaan kappaleen nimellimitoille, tyynyn ollessa jokaisessa suunnassa valitun leikkausvälin verran suurempi. Leikkausvälillä tarkoitetaan pistimen ja tyynyn yhden puolen välistä etäisyyttä. Kappaletta irrottaessa tyynyn aukko valmistetaan kappaleen nimellimitoille, pistimen ollessa joka suuntaan leikkausvälin verran pienempi. Pistimen tunkeuduttua ohutlevyyn pistimen ympärillä olevaan materiaaliin syntyy puristusjännitys. Kun pistin poistuu aukosta, ympärillä oleva materiaali joustaa jännityksen vapautuessa, jolloin muodostunut reikä hieman pienenee. Tämä jousto, joka riippuu levyn paksuudesta, voidaan tarvittaessa huomioida mitoittamalla pistimen halkaisija noin 0,03–0,05 mm:ia halutun reiän halkaisijaa suuremmaksi. Vastaavasti kappaletta irrottaessa leike laajenee hieman kuljettuaan tyynyn läpi. Laajeneminen voidaan huomioida mitoittamalla tyyny 0,015–0,025 mm alimittaiseksi. [37]

4.4 Leikkaaminen meistityökalulla

Tuotteen laadun kannalta on tärkeää tietää, miten materiaali leikkautuu. Syntyvään leikkaustulokseen vaikuttavat ensisijaisesti leikattava materiaali, leikkaustyökalu, leikkausolosuhteet sekä leikkainterien kunto. Jotta materiaali saadaan leikkautumaan, on sen murtolujuus ylitettävä. Meistoleikkauksen eri vaiheet on esitetty kuvassa 15. [37]



Kuva 15. Leikkaustapahtuman vaiheet. [37]

Ensimmäisessä vaiheessa pistin painaa ohutlevyn tyynyä vasten, poistaen pistimen ja tyynyn väliset välykset. Tässä vaiheessa ohutlevyyn kohdistuu puristusjännitystä, jonka seurauksena levyssä alkaa tapahtumaan kimmoista muodonmuutosta. Toisessa vaiheessa materiaalin myötölujuus ylittyy, jolloin materiaalissa käynnistyy plastinen muodonmuutos. Plastisen muodonmuutoksen aikana materiaali alkaa liukumaan leikkausreunaa pitkin, kohti tyynyn aukkoa. Tässä vaiheessa materiaali alkaa myötölujittumaan sen leikkausreunan kohdalta, jolloin myös leikkaukseen tarvittavan leikkausvoiman suuruus kasvaa. Kolmannessa vaiheessa alkaa materiaalin leikkautuminen. Kun puristusvoima kasvaa niin suureksi, että materiaalin muodonmuutoskyky ylittyy, kappale alkaa murtumaan, yleensä ensimmäisenä tyynyn puolelta. Lopulta murtuminen pääsee etenemään samanaikaisesti tyynyn ja pistimen puolelta, aiheuttaen murtumien kohtaamisen, mikä lopulta johtaa kappaleen irtileikkautumiseen. Meistotöissä kappale siis irtaoo leikkautumisen ja murtumisen yhteisvaikutuksesta. [37, 38, 40, 42]

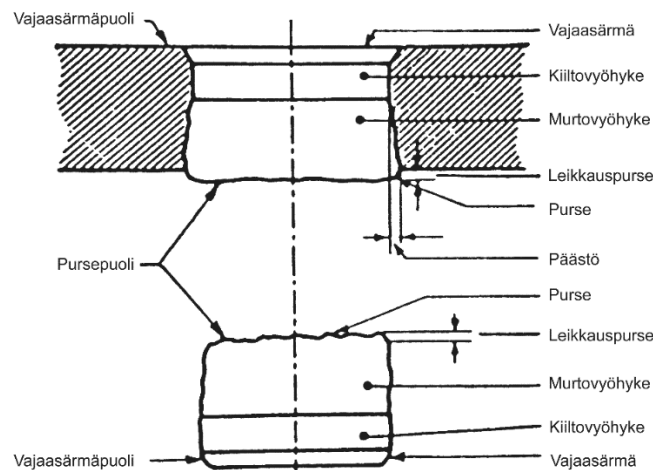
Leikkautumiseen tarvittava puristusvoima riippuu pääosin meistettävän materiaalin lujuudesta ja levyn paksuudesta. Leikkausprosessin loppuvaiheessa materiaalin murtuminen tapahtuu nopeammin kuin leikkautuminen, jolloin materiaalin irtileikkautumisessa puristimen jännitykset laukeavat, mikä nähdään työkalua rasittavana värähtelynä. Tämä värähtely kasvaa leikkausvoiman kasvaessa. Värähtely saattaa kasvattaa pistimen kulkemaa matkaa niin, että se on yhden iskun aikana jopa kolme kertaa levyn paksuuden verran. Värähtely lisää työkalun kulumista sekä leikkausprosessissa syntyvää melua, minkä vuoksi tukevan puristimen käyttö on suositeltavaa. [37, 38, 40]

4.5 Leikkauspinnan muodostuminen

Materiaaliin muodostunut leikkauspinta koostuu useasta eri vyöhykkeestä, joiden muotoon vaikuttavat materiaalissa tapahtuvat muodonmuutokset. Ensisijaisesti leikkauspinnan laatuun vaikuttavat pistimen ja tyynyn välinen leikkausväli, materiaalin mekaaniset ominaisuudet sekä pistimen helpotus. [37, 38] Tavallisesti tasalaatuiselle, matalan murtolujuuden omaavalle, sitkeälle materiaaleille muodostuu meistoprosessissa hyvä leikkauspinnan laatu. [38]

Muodostuneesta leikkauspinnasta nähdään eri leikkausvaiheet, jotka on esitetty kuvassa 16. Leikkauspinnan yläreunassa on havaittavissa pyöristynyt vajaasärmä, jonka pistin muodostaa levyn yläpintaan ja tyyny irtileikkautuvan osan alapintaan. Vajaasärmä muodostuu, kun materiaalissa tapahtuu plastista muodonmuutosta. Vajaasärmän alapuolella nähdään tasainen kiiltovyöhyke, joka aiheutuu, kun pistin tunkeutuu ohutlevyyn, yhteisvaikutuksena materiaalin leikkautumisen kanssa. Materiaalin leikkautuminen tapahtuu murtumalla pistimen ja tyynyn teräsärmistä lähteneiden murtohalkeamien kohdatessa. Tämän seurauksena leikkauspintaan muodostuu pinnaltaan karkea murtovyöhyke. [35, 38]

Leikkausprosessissa saattaa syntyä myös pursetta, sillä suurimmat puristusjännitykset suuntautuvat pistimestä vinosti kohti tyynyn leikkaavaa särmää. Tämä aiheuttaa leikkausvyöhykkeessä venyvään materiaaliin poikittaisjännityksen, joka parantaa materiaalin muodonmuutoskykyä. Tästä johtuen ohutlevy ei repeä aivan leikkaavan särmän kohdalta, vaan sen vierestä, jossa materiaalin myötölujittuminen on vähäisempää. Ohutlevy murtuu liu'uttuaan leikkaavan särmän ohi. Tällöin ohutlevyn leikkauskohtaan muodostuu terävä kohoama, jota kutsutaan purseeksi. [40, 42] Työkalujen kuluessa materiaalin liukuminen voimistuu, jolloin puristusjännitykset jakautuvat laajemmalle alueelle. Tästä seuraa purseen korkeuden kasvaminen. Työkalujen kulumisen onkin pääsyy purseen muodostumiselle. [38, 40] Purse kuuluu murtovyöhykkeeseen ja se muodostuu leikkeessä pistimen puolelle ja aukossa tyynyn puolelle. [37, 38]

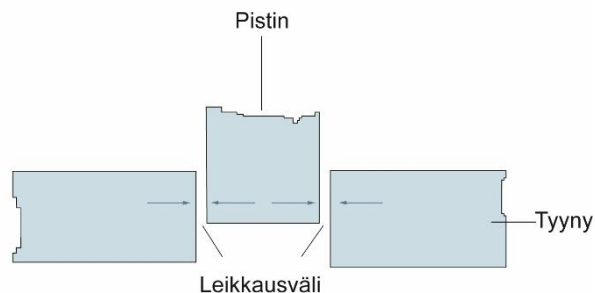


Kuva 16. Rainan ja leikkeen leikkauspinta. [35]

Nyrkkisääntönä hyvälle leikkauspinnalle voidaan pitää sellaista pintaa, jossa kiiltovyöhykkeen koko on mahdollisimman suuri ja purseen määrä taas mahdollisimman pieni. Purseen muodostumista käytetäänkin yleisesti mittarina työkalujen teroitustarpeen määrittämiseen. Mikäli purseen määrä tai sen pituus kasvaa, on syytä teroittaa työkalut, jotta leikkauspinnan laatu saadaan pidettyä hyvällä tasolla. [37, 38]

4.6 Leikkausvälin vaikutus leikkauspintaan

Leikkausvälillä tarkoitetaan pistimen ja tyynyn yhden puolen välistä etäisyyttä, joka on havainnollistettu kuvassa 17. Leikkausväli annetaan usein prosentteina ja tavallisesti sen suuruusluokka on noin 3–12.5 % leikattavan ohutlevyn paksuudesta. Leikkausväli on syytä valita tarkasti, sillä sen suuruudella on merkittävä vaikutus muodostuneen leikkauspinnan laatuun, leikkaimen kestoikään ja teroitusväliin, muodostuvan purseen määrään sekä tarvittavan leikkausvoiman suuruuteen. [35, 36, 37, 38, 40]



Kuva 17. Pistimen ja tyynyn leikkausväli. [39]

Leikkausväli valitaan yleensä leikattavan ohutlevyn paksuuden ja materiaalin murtolujuuden R_m mukaan. [42] Yhtälössä 23 on esitetty Oehlerin yhtälö leikkausvälin valintaan. Yhtälö on voimassa alle 3 mm paksuisille ohutlevyille. Yhtälössä R on leikkauslujuus, u on leikkausväli, s on leikattavan ohutlevyn paksuus ja C leikkauspinnan laadusta riippuva vakio, joka valitaan väliltä 0,005–0,035. Mikäli leikkauspinta on sileä, C :n arvoksi valitaan 0,005. [37, 43]

$$u = C \times s\sqrt{R} \quad (23)$$

Leikkauslujuuden R arvo voidaan approksimoida yhtälön 24 avulla, missä R_m on materiaalin murtolujuus. [43]

$$R \approx 0,8 \times R_m \quad (24)$$

Mahdollisimman sileän ja suoran leikkauspinnan aikaansaamiseksi leikkausväli on valittava oikean suuruiseksi ja leikkaustyökalun leikkaavien särmien tulee olla terävät. Leikkausvälin on oltava pistimen ja tyynyn väliltä kaikkialta samansuuruinen. Mikäli näin ei ole, pistimeen kohdistuu poikittaisvoimia, jolloin riski pistimen taipumiselle ja kulumiselle kasvaa. [35, 37, 40] Useimmiten käytettäväksi leikkausväliksi valitaan suurin arvo, jolla leikkauspinnan laatu täyttää valmistajan vaatiman speksin, juuri työkalun kulumisen ja leikkausvoiman kasvamisen vuoksi. [36] Tavallisesti pienemmällä leikkausvälillä saadaan erittäin hieno leikkauspinnan laatu, mutta samalla se asettaa suuret vaatimukset työkalun valmistustarkkuudelle ja kestävyydelle. Mitä laadukkaampi leikkauspinnasta halutaan, sitä useammin leikkaintyökalua on myös teroitettava, mistä aiheutuu pitkällä aikajänteellä suuret huoltokustannukset. [35, 37]

Pistimen ja tyynyn reunasta lähtevät halkeamat muodostavat yleensä noin 6° – 7° :n kulman pistimen liikesuuntaan nähden. Tästä johtuen leikkausväli on valittava sitä pienemmäksi, mitä syvemmälle pistin tunkeutuu ennen murtumien muodostumista. Tästä johtuen yleensä sitkeille materiaaleille käytetään pienempää leikkausväliä hauraisiin materiaaleihin verrattuna. Samasta syystä leikkausvälin tulee olla suhteellisesti pienempi ohuille kuin paksuille materiaaleilla. [40]

Suuri leikkausväli pienentää leikkaus- ja irrotusvoimien suuruutta ja näin ollen lisää työkalun kestoikää sekä harventaa leikkaimien teroitusväliä. Haittapuolena tosin on, että

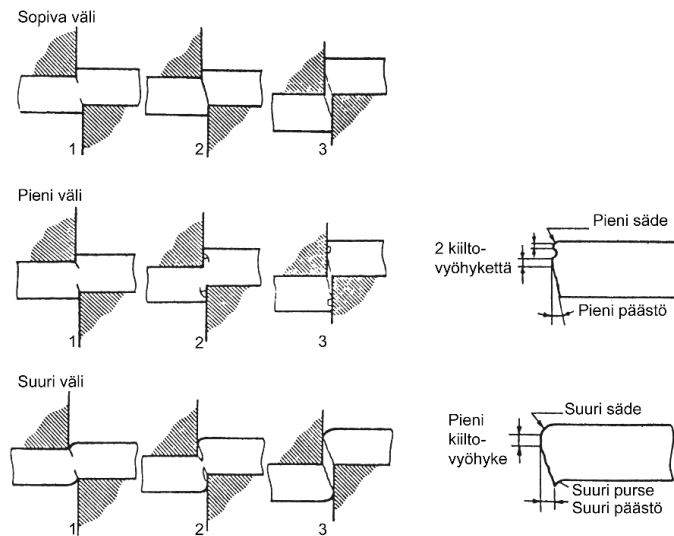
tällöin muodostuneen leikkauspinnan laatu ei ole enää paras mahdollinen. Useimmiten tällöin myös muodostuneen purseen määrä on suurempi pienempään leikkausväliin verrattuna. [35, 36, 37]

Kuvan 18 havaintokuvissa on vertailtu erilaisten leikkausvälien vaikutusta muodostuvien murtumien kohtaamiseen. Hyvän leikkauspinnan aikaansaamiseksi leikkausväli on valittava siten, että pistimen puolelta alkava murtuma kohtaa tyynyn puolelta alkavan murtuman. [37, 38] Oikealla leikkausvälillä murtohalkeama osuu suoraan terien leikkaaviin särmiin, jolloin levy leikkautuu suoraan, eikä sen leikkaamiseen tarvita ylimääräistä energiaa. [38, 42] Tällöin muodostunut leikkausjälki jää levyn murtumiskulman verran vinoksi. Muodostunut leikkauspinta on silmämääräisesti tarkasteltuna tasomainen ja muodostuneen kiiltovyöhykkeen osuus on noin 20 % leikkauspinnasta. [42]

Mikäli leikkausväli on liian pieni, murtumien päätepisteet osuvat terien keskikohdalle, jolloin terät joutuvat itse asiassa leikkaamaan levyn kahdesti. Tämä aiheuttaa leikkurille ylimääräistä rasitusta sekä lohkeamisvaaran leikkausterille. Liian pienellä leikkausvälillä kiiltovyöhykkeen osuus leikkauspinnasta on suuri ja murtovyöhykkeen osuus taas pieni. [38, 42]

Leikkausvälin ollessa liian suuri, muodostuneet murtumat eivät osu suoraan terien särmiin, jolloin syntyvään leikkausreunaan muodostuu epäjatkuvuuskohta, josta aiheutuu purseen muodostumista sekä leikkausterän kulumista. Lisäksi leikattava ohutlevy taipuu ennen katkeamista, jolloin leikkauspintaan muodostuu vahvasti ulkonevia särmiä. [38, 42]

Tavallisesti liiallisen leikkausvälin käyttäminen aiheuttaa materiaalin leikkausreunaan suurta plastista muodonmuutosta. Tämän lisäksi leikkauksessa muodostuva murtokulma on myös suuri, josta seuraa leikkauspinnan vajaasärmän, kiiltovyöhykkeen sekä syntyvän purseen kasvaminen, samalla kun muodostuvan murtovyöhykkeen koko jää pieneksi. [38]



Kuva 18. Leikkausvälin vaikutus murtumien kohtaamiseen. [37]

4.7 Leikkausvoima

Kun materiaalia leikataan suljettua leikkausviivaa pitkin, suurin tarvittava leikkausvoima saadaan yhtälön 25 avulla. Yhtälössä F on leikkausvoima, L on leikkausviivan pituus, s on leikattavan levyn paksuus ja k on leikkausvastus. [37, 38]

$$F_{max} = L \times s \times k \quad (25)$$

Leikkausvastuksen arvo saadaan joko alan kirjallisuuden taulukoista tai sen arvoksi voidaan approksimoida noin 80 % materiaalin vetomurtolujuudesta yhtälön 26 avulla. Yhtälössä C on 0,8 (vakio väliltä 0,6–0,9) ja R_m on materiaalin murtolujuus. [37, 38]

$$k = C \times R_m \quad (26)$$

Mikäli työkalun kuluminen halutaan ottaa huomioon, se saadaan kertoimen 1,2 avulla seuraavasti (yhtälö 27). [37, 38]

$$F = 1,2 \times L \times s \times k \quad (27)$$

Edellä esitelty leikkausvoiman yhtälöt pätevät ainoastaan leikattaessa pistimen ja tyynyn avulla, joissa pistimen pään taso on samansuuntainen tyynyn pinnan kanssa. [37, 38]

Meistämiseen tarvittava leikkausvoima saattaa muodostua suuremmaksi kuin puristimen aikaansaama voima. Tällöin tarvittavaa leikkausvoimaa pienennetään muotoilemalla

helpotus joko pistimeen tai tyynyyn. Viistämällä pistintä tai tyynyä leikkausvoiman tarvetta voidaan pienentää jopa 40 %. [37, 38] Tavallisesti käytetään viistettä, joka on 1,5–2 kertaa levyn paksuinen, jolloin leikkausvoiman väheneminen riippuu leikkauksen pituudesta. Tällöin tarvittavan leikkausvoiman suuruus saadaan yhtälön 28 avulla. Yhtälössä A on leikkauspinta-ala [mm²] ja R on leikkauslujuus [N/mm²]. [37]

$$F = 0,67 \times A \times R \quad (28)$$

5. Pii-rauta sähköteräs

Tässä luvussa tarkastellaan magneettisesti pehmeisiin materiaaleihin lukeutuvien pii-rauta-sähköterästen rakennetta, niiden tärkeimpiä ominaisuuksia sekä rautahäviöiden muodostumiseen johtavia materiaalista riippuvia syitä. Tarkastelun kohteena ovat 2–3 %:ia piitä sisältävät matalan piipitoisuuden pii-rauta-sähköteräkset, joita jatkossa kutsutaan yleisesti sähköteräksiksi.

Sähköteräkset jaetaan kahteen luokkaan: kidesuunnattomiin sähköteräksiin (*nonoriented silicon steel*) ja kidesuunnattuihin sähköteräksiin (*grain-oriented silicon steel*). Kidesuunnattomat sähköteräkset soveltuvat pyörivien sähkökoneiden rautasydän-materiaaliksi, kun taas kidesuunnattusta sähköteräksestä valmistetaan lähinnä muuntajien rautasydämet. Tässä luvussa keskitytään lähinnä tarkastelemaan kidesuunnatonta sähköterästä.

5.1 Yleistä sähköteräksistä

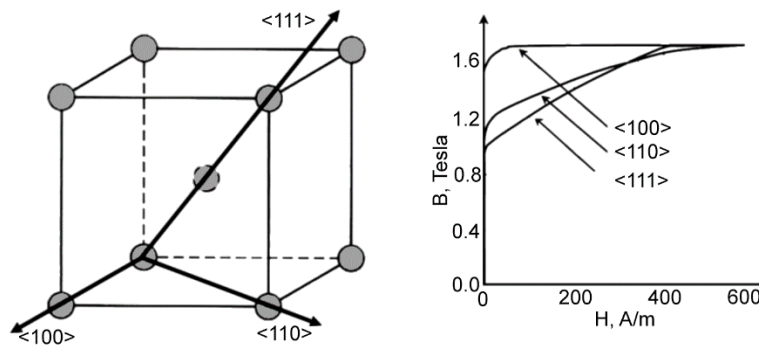
Sähköteräkset ovat erikoisteräksiä, joita käytetään lähinnä pyörivien sähkökoneiden staattori- ja roottorilevyjen valmistamiseen. Sähköteräkset ovat luonteeltaan helposti magnetoitavissa (tai vaihtoehtoisesti demagnetoitavissa), jolloin ne soveltuvat erinomaisesti käytettäväksi sellaisiin teknisiin sovelluksiin, joissa hyödynnetään vaihtelevaa magneettikenttää. [7, 44] Tällä hetkellä valtaosa sähkökoneiden rautasydänten valmistukseen käytetyistä sähköteräksistä sisältää keskimäärin noin 2–3 %:ia piitä, loppuosan koostuessa lähinnä raudasta. [6]

Sähköteräkset ovat paksuudeltaan, SFS-EN 10106 standardin mukaisesti, joko 0,35 mm, 0,50 mm, 0,65 mm tai 1,00 mm. Tämän lisäksi sähköteräksen pinnan tulee olla sileä ja puhdas kaikista epäpuhtauksista, kuten rasvasta ja ruosteesta. Jos sähköteräs on pinnoitettu eristävällä pinnoitteella, on pinnoitteen lisäksi kestettävä erilaiset leikkausprosessit. [45]

Sähkökoneiden rautasydämet valmistetaan pinoamalla useita sähköteräslevyjä ristikkäin 90° kulmissa toisiinsa nähden, jolloin rautasydämen magneettiset ominaisuudet saadaan mahdollisimman isotrooppisiksi eli suunnasta riippumattomiksi. [46] Näin ollen myös

rautasydämessä vaikuttavien pyörrevirtojen kulkureitit saadaan katkaistua, jolloin sähkökoneen pyörrevirtahäviöt saadaan poistettua lähes kokonaan. [7, 8]

Sähköteräksen magneettiset ominaisuudet ovat vahvasti riippuvaisia sähköteräksen kristallografisesta suuntautumisesta eli siitä, miten sähköteräksen rautakiteet ovat suuntautuneet sen rakenteessa. [44] Rautakiteet saattavat olla järjestäytyneinä täysin satunnaisiin suuntiin, jolloin materiaali on magneettisesti isotrooppista. Kiteet voivat myös asettua tietyn kidesuunnan, niin sanotun helpon magnetointisuunnan mukaisesti, jolloin materiaalin magneettiset ominaisuudet riippuvat tästä kidesuunnasta. Tällöin materiaalin sanotaan olevan magneettisesti anisotrooppista. Magneettinen anisotrooppisuus on havaittavissa myös materiaalin magnetointikäyrästä. [47] Kuvassa 19 on esitetty raudan tilakeskisen kuutiollisen (T.K.K.) helposti magnetoituvien suunta $\langle 100 \rangle$ sekä vaikeimmin magnetoituvien suunta $\langle 111 \rangle$, sekä näiden suuntien vaikutus raudan magnetointikäyrään. [7, 47]



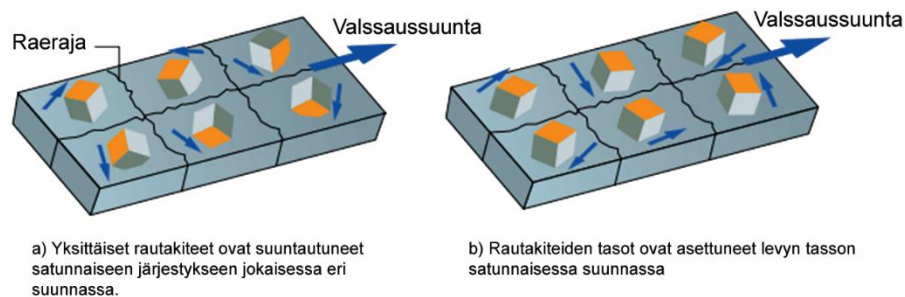
Kuva 19. Kuvassa on esitetty kolme erilaista magnetointikäyrää yksittäiselle T.K.K. rautakiteelle. [7]

5.2 Kidesuunnaton sähköteräs

Ensimmäisten sähkökoneiden rautasydämet valmistettiin tavallisesti yhdestä kiinteästä valurautakappaleesta, jolloin muodostuvien pyörrevirtahäviöiden määrät kasvoivat valtaviksi. Tämä taas johti sähkömoottorin kuumenemiseen käytön aikana. Aikakautensa ohutlevyvalmistajat yrittivät ratkaista ongelmaa valmistamalla rautasydämet pinotuista ohutlevyistä. Menetelmän avulla onnistuttiin estämään pyörrevirtojen liikettä, ja sitä käytetäänkin edelleenkin pyörrevirtahäviöiden poistamiseen. Kuitenkin parannetusta

valmistustavasta huolimatta sähkökoneiden tehohäviöt olivat edelleen korkeita ja sähkökoneiden kuumeneminen käytön aikana liian suurta, mikä hankaloitti sähkökoneiden käyttöä. 1900-luvun taitteessa havaittiin, että seostamalla piitä rautaan, teräksen resistiivisyys saadaan kasvamaan ja tällöin syntyvien pyörrevirtojen määrät pienenemään. Yleisesti tämän kidesuunnattoman sähköteräksen keksijänä pidetään englantilaista metallurgia Robert Hadfieldia (1858-1940). [7, 8]

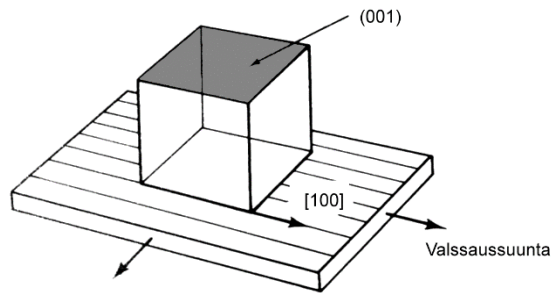
Kidesuunnaton sähköteräs on magneettisesti isotrooppista, jolloin se soveltuu käytettäväksi pyörivien sähkökoneiden staattori- ja roottorilevyjen valmistusmateriaaliksi. [7] Valssattaessa kidesuunnatonta sähköterästä levyksi, sähköteräksen rakenteen yksittäiset rautakiteet asettuvat satunnaiseen järjestykseen, mikä on esitetty kuvassa 20a. Sähköteräksen tekstuurilla on kuitenkin merkitystä muun muassa sen permeabiliteettiin, minkä vuoksi kidesuunnaton sähköteräs halutaan yleensä valmistaa siten, että jokaisen rautakiteen yksi kuution sivuista on asettunut valssaustason suuntaisesti, kuitenkin siten, että yksittäiset rautakiteet ovat satunnaisesti suuntautuneina toisiinsa nähden. Tämä tilanne on esitetty kuvassa 20b. [7, 8] Kun valssaustasoksi valitaan raudan helposti magnetoituvien suunta $\langle 100 \rangle$, kidesuunnattomalle sähköteräkselle saadaan muodostettua parhaat magneettiset ominaisuudet jokaisessa suunnassa. [7, 8]



Kuva 20. Kuvassa (a) on esitetty kidesuunnattoman teräksen rakenne, missä yksittäiset rautakiteet ovat suuntautuneet satunnaiseen järjestykseen jokaisessa eri suunnassa. Toisessa rakenteessa (b) on kuvattu niin sanottu kehittynyt rakenne, jossa kaikkien yksittäisten rautakiteiden yksi tasoista on asettunut levyn tasoon nähden, kuitenkin rautakiteiden ollessa satunnaisesti suuntautuneina toisiaan nähden. [48]

Kaikista optimaalisin tekstuuri kidesuunnattomalle sähköteräkselle on niin kutsuttu kuubinen rakenne $\{100\} \langle 100 \rangle$, jossa helposti magnetoituvien suunta esiintyy myös materiaalin poikittaissuunnassa. Tällöin kidesuunnaton sähköteräs on magneettisesti

täysin isotrooppista. Rakennetta on tutkittu lähinnä teoreettisesti. [7, 47] Kuubinen rakenne on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Kuubinen rakenne. [7, muokattu lähteestä]

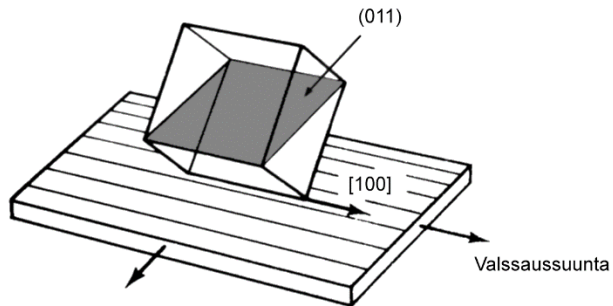
Kidesuunnaton sähköteräs voidaan toimittaa asiakkaalle kahdessa tilassa; joko täysijalostettuna (*fullyprocessed*) tai puolijalostettuna (*semiprocessed*). Nämä eroavat toisistaan siten, että täysijalostetulle sähköteräkselle on suoritettu optimaaliset lämpökäsittelyt jo terästehtaalla, kun taas puolijalostetulle sähköteräkselle on suoritettava erilliset lämpökäsittelyt työstövaiheiden jälkeen. Puolijalostetuille sähköteräksille meistoleikkauksen jälkeinen lämpökäsittely on ehdoton, jotta materiaalin magneettiset ominaisuudet saadaan palautettua lähes alkuperäiselle tasolle. [7]

5.3 Kidesuunnattu sähköteräs

Kidesuunnatun sähköteräksen kehitti amerikkalainen metallurgi Norman Goss vuonna 1933. Goss havaitsi, että suorittamalla teräkselle välihehkutuksia kylmävalssauksen aikana, ja tämän jälkeen suorittamalla viimeinen hehkutus korkeassa lämpötilassa, sähköteräslevyn magneettiset ominaisuudet paranevat merkittävästi valssaussuunnassa. Tämä magneettisesti erittäin suotuista tekstuuri aikaansaadaan sekundäärinen rekristallisaation avulla, kun sähköterästä hehkutetaan korkeassa lämpötilassa. [7]

Sekundäärinen rekristallisaation aikaansaama tekstuuri eroaa huomattavasti primäärinen rekristallisaation muodostamasta rakenteesta. Primäärisessä rekristallisaatiossa sähköteräksen rakenne jää epäsäännölliseksi, kun taas sekundäärisellä rekristallisaatiolla aikaansaadaan selkeä kiteinen $\{110\} \langle 100 \rangle$ rakenne, jota kutsutaan Goss-rakenteeksi. Goss-rakenteen avulla sähköteräs saadaan käyttäytymään kuin yksittäinen kide, jolloin sähköteräksestä saadaan magneettisesti täysin anisotrooppista. [47, 49]

Goss-rakenne on esitetty kuvassa 22. Kuvasta nähdään, että Goss-rakenteen kidehilassa ainoastaan yksi kuution kulmista yhtyy valssaussuuntaan, joka valitaan raudan helpon magnetoinnin suunnaksi $\langle 100 \rangle$. [47]



Kuva 22. Goss-rakenne. [7, muokattu lähteestä]

Kidesuunnatun sähköteräksen anisotrooppisesta luonteesta johtuen sen magneettiset ominaisuudet ovat hyvät ainoastaan Goss-rakenteen suunnassa. Tästä syystä materiaali soveltuu erinomaisesti muuntajien rautasydän materiaaliksi. [7, 8] Jos kidesuunnattua sähköterästä magnetoidaan Goss-rakenteelle vastakkaiseen suuntaan, sen magneettiset ominaisuudet kärsivät rajusti. Esimerkiksi Cullity et al. [7] mukaan vastakkaiseen suuntaan magnetoitaessa kidesuunnatun sähköteräksen permeabiliteetti on alle 2 % Goss-suunnan permeabiliteetista. Tästä johtuen kidesuunnattu sähköteräs ei sovellu käytettäväksi pyörivien sähkökoneiden rautasydänmateriaaliksi. [7]

6. Ferromagneettisen materiaalin magnetoituminen ja rautahäviöt

Tässä luvussa käsitellään ferromagneettisten materiaalien magnetoituminen sekä rautahäviöiden muodostuminen ja niiden vähentämiseen vaikuttavat tekijät.

Sähkökoneiden häviöt koostuvat mekaanisista häviöistä, käämihäviöistä ja rautahäviöistä. Tässä työssä käsitellään ainoastaan sähkökoneiden rautahäviöitä. Rautahäviöt (eli magneettihäviöt) aiheutuvat sähkökoneen staattori- ja roottorilevyistä koostuvan rautasydämen muuttuvasta magneettikentästä. Ferromagneettisten materiaalien rautahäviöt jaetaan kahteen komponenttiin; hystereesi- ja pyörrevirtahäviöihin. Näistä molemmat perustuvat samaan fysikaaliseen ilmiöön, jota kutsutaan sähkövirran aiheuttamaksi Joule-lämpenemiseksi. [46, 9]

6.1 Yleistä magneettisista materiaaleista

Magneettiset materiaalit jaetaan niiden magneettisten ominaisuuksien perusteella ferro-, dia- ja paramagneettisiin materiaaleihin. Tämä jaottelu perustuu siihen, miten materiaali pystyy muuttamaan sen ulkoista magneettikenttää. Ferromagneettiset materiaalit pystyvät magnetoitumaan voimakkaasti ja näin ollen muodostamaan myös pysyviä magneetteja. Tämän lisäksi ferromagneettiset materiaalit vahvistavat voimakkaasti ulkoista magneettikenttää. Mikäli ferromagneettisten materiaalien lämpötila nostetaan sen Curie-lämpötilan yläpuolelle, materiaali muuttuu paramagneettiseksi. Para- ja diamagneettiset materiaalit ovat taas luonteeltaan heikosti magneettisia. Nämä eroavat toisistaan siten, että paramagneettiset materiaalit pystyvät vain hieman vahvistamaan ulkoista magneettikenttää, kun taas diamagneettiset materiaalit heikentävät tätä. Diamagneettisten materiaalien atomit eivät ole siis alkeismagneetteja. Esimerkkejä ferromagneettisista materiaaleista ovat muun muassa rauta, nikkeli ja koboltti. Paramagneettisia materiaaleja ovat taas esimerkiksi alumiini, kromi ja molybdeeni. Diamagneettisiin materiaaleihin lukeutuu muun muassa pii, kupari, hopea ja kulta. [6, 7, 8, 50]

Osa ferromagneettisista materiaaleista pystyy magnetoitumaan pysyvästi, eli ne pystyvät säilyttämään magneettisuutensa ilman ulkoista magneettikenttää. Tällöin puhutaan yleisesti magneettisesti kovista materiaaleista. Mikäli materiaali menettää magneettisuutensa, kun ulkoinen kenttä poistetaan, puhutaan magneettisesti pehmeistä

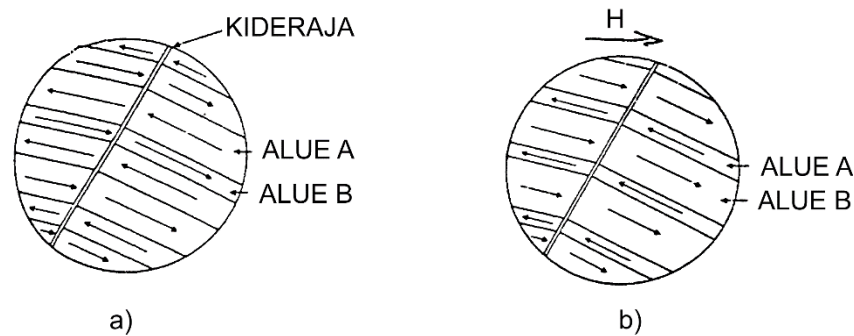
materiaaleista. [7, 8] Magneettiset pehmeät materiaalit ovat helposti magnetoitavissa tai vaihtoehtoisesti demagnetoitavissa. Tavallisesti magneettisesti pehmeitä materiaaleja käytetään sähköteknisissä sovelluksissa magneettivuon vahvistamiseen ja sen ohjaamiseen. [7] Sähkökoneiden rautasydämet valmistetaan magneettisesta pehmeistä materiaaleista, tavallisesti piirauta-ohutlevyistä.

6.2 Ferromagneettisen materiaalin magnetoituminen

Magneettisesta näkökulmasta tarkasteltuna ferromagneettisen materiaalien kiderakenne koostuu useasta magneettisesti kyllästyneestä pienestä alueesta, joissa kaikkien saman alueen atomien magneettiset momentit ovat suuntautuneet samansuuntaisesti silloinkin, kun ulkoista magneettikenttää ei ole. Näitä alueita kutsutaan Weissin-alueiksi ja ne ovat kooltaan noin $0,1\text{--}0,001\text{ mm}^3$. Erisuuntaiset Weissin-alueet erotetaan toisistaan Blochin-seinämien avulla, joiden paksuus vaihtelee muutamasta sadasta noin tuhannen atomin etäisyyteen. [9, 51, 52]

Materiaalin Weissin-alueiden kasvaminen ulkoisen magneettikentän voimakkuuden H vaikutuksesta, voi tapahtua kahden itsenäisen prosessin vaikutuksesta. Ulkoisen magneettikentän voimakkuuden ollessa heikko jo valmiiksi kentän suuntaan asettuneet Weissin-alueet kasvavat vastakkaissuuntaisten alueiden kustannuksella, kun taas voimakkaassa magneettikentässä poikittaissuunnassa olevat Weissin-alueet kiertyvät kentän suuntaisiksi. [7, 47, 52]

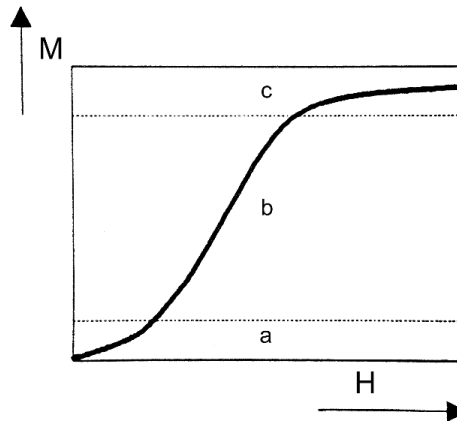
Ilman ulkoista magneettikenttää H ei-magnetoituneen raudan Weissin-alueiden magneettimomentit kumoavat toisensa, ja tällöin rauta näyttää magnetoitumattomalta (kuva 23a). Kun ferromagneettinen materiaali tuodaan ulkoiseen magneettikenttään, Blochin-seinämät liikkuvat siten, että suunnaltaan lähinnä ulkoista magneettikenttää olevat Weissin-alueet kasvavat, kun taas ne alueet, joiden suunta on päinvastainen ulkoisen magneettikentän kanssa pienenevät. Tämä on esitetty kuvassa 23b. Tällöin raudan yhteenlaskettu magneettimomentti kasvaa nolasta poikkeavaksi ja rauta magnetoituu. Tämä yksinkertaistettu periaate selittää raudan magnetoitumisen magneettikentässä. Raudan sanotaan kyllästyvän, kun Blochin-seinämät eivät enää onnistu siirtymään helposti, mikä nähdään myös magnetoitumiskäyrän kaareutumisenä. [51]



Kuva 23. Raudan magneettiset alueet: a) ulkoinen kentänvoimakkuus on nolla, b) ulkoisen kentänvoimakkuuden H kasvaessa ne Weissin-alueet pienenevät, jotka eivät ole alun perin suuntautuneet ulkoisen kentän mukaisesti. [51]

Blochin-seinämien siirtymiseen vaikuttavat vahvasti materiaalissa olevat epäpuhtaudet, kuten hiili, materiaalin sisäiset jännitykset, kiderakenteen suuntautuminen sekä raekoko. Tavallisesti Blochin-seinämät takertuvat näiden epäpuhtauksien ja kidevirheiden kohdalle, jolloin seinämien siirtymiseen tarvitaan voimakkaampi kenttä eli enemmän energiaa. Mikäli materiaaliin vaikuttaa heikko ulkoinen magneettikentän voimakkuus, Blochin-seinämät pystyvät siirtymään vain hiukan lepoasemastaan, ja jos tämän jälkeen magneettikentän voimakkuus poistetaan, Blochin-seinämät siirtyvät takaisin alkuperäisille paikoilleen. [9] Mikäli magneettikentän voimakkuus kasvaa jyrkästi, Blochin-seinämät pystyvät nopeasti irrottautumaan lepoasemistaan, eivätkä ne tällöin enää palaa alkuperäisiin tiloihinsa, vaikka ulkoinen kentänvoimakkuus poistettaisiin. Näitä Blochin-seinämien nopeita liikahduksia kutsutaan Barkhausenin hypähdyksiksi. Barkhausenin hypähdyksillä on merkittävä vaikutus magneettisen materiaalin hystereesisilmukan käyttäytymiseen. [47, 9, 52]

Bloch in seinämien liikkuminen tapahtuu laajalla magneettikentän voimakkuusalueella. Osa seinämistä pystyy liikkumaan helposti pienilläkin magneettikentän voimakkuuksilla, kun taas osa vaatii liikkuaakseen suuren magneettikentän voimakkuuden. Kuva 24 esittää ferromagneettisen materiaalin magnetoitumakäyrää $M-H$, jossa on erotettavissa kolme magnetoitumisen eri vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa tapahtuu ainoastaan palautuvia muutoksia. Toisessa vaiheessa nähdään Barkhausenin hypähdyksien palautumattomia muutoksia ja kolmannessa vaiheessa tapahtuu Weissin-alueiden kiertymistä, minkä jälkeen kaikki alueet ovat kääntyneet ulkoisen magneettikentän suuntaiseksi. Tämän vaiheen jälkeen materiaali on saavuttanut sen kyllästysmagnetoituman M_s . [47]



Kuva 24. Ferromagneettisen materiaalin magnetoitumiskäyrä. Kohdassa a) tapahtuu ainoastaan palautuvia Blochin seinämien siirtymisiä, kohdassa b) muodostuu Barkhausenin palautumattomia hypähdyksiä ja kohdassa c) kaikki Weissin alueet ovat suuntautuneet yhdensuuntaisiksi, jolloin materiaali kyllästyy. [47]

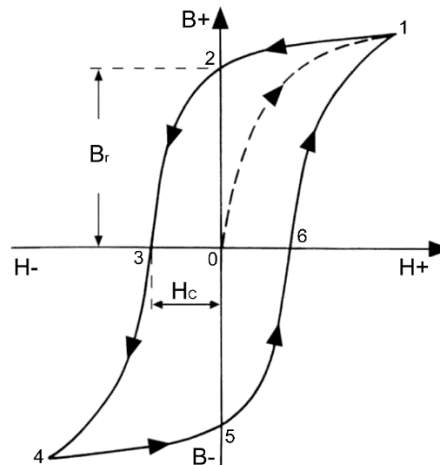
6.3 Raudan magneettiset ominaisuudet

Sähkökoneen rautasydän valmistetaan tavallisesti eri tavoin seostetusta sähkölevystä, joka onkin samalla teknisten sovelluksien käytetyin magneettinen materiaali. Magneettisen materiaalin tärkein tehtävä on muodostaa magnetomotorisen voiman (mmv) kanssa magneetikenttä. Magnetomotorinen voima kehittää magneettivuon ϕ , ja se on verrattavissa sähkövirtapiirin sähkövirran synnyttävään sähkömotoriseen voimaan (smv) E . [50]

Ferromagneettiset materiaalit omaavat suuren permeabiliteetin, jolla kuvataan materiaalin magneettivuon tiheyden suhdetta magneetikentän voimakkuuteen. Lisäksi ferromagneettisista materiaaleista valmistettujen rautasydänten magneettivastus eli reluktanssi on pieni. Edellä mainituista seikoista johtuen ferromagneettisille materiaaleille saadaan muodostettua suuria magneettivuon tiheyksiä suhteellisen pienen magnetomotorisen voiman ja kentänvoimakkuuden avulla. [50]

6.3.1 Hystereesisilmukka

Materiaalin magnetoituminen voidaan kuvata BH -käyrällä eli hystereesisilmukalla. Hystereesisilmukalla esitetään graafisesti magneettisen materiaalin magneettivuon tiheyden B riippuvuus materiaalin magneettikentän voimakkuudesta H . [50] Kuvassa 25 on esitetty esimerkki ferromagneettisen materiaalin hystereesisilmukasta.



Kuva 25. Ferromagneettisen materiaalin hystereesisilmukka. [53]

Kuvassa katkoviivalla merkitty reitti pisteestä 0 pisteeseen 1 esittää magneettisen materiaalin magnetoitumiskäyrää. Kun magneettisesti täysin kyllästetyn materiaalin (kuvassa piste 1) ulkoinen magneettikenttä poistetaan, materiaalin magneettivuon tiheys ei pienene nollaan, vaan materiaaliin jää remanenssivuontiheys B_r , jota vastaa kuvan piste 2. Jotta materiaalin vuontiheys saataisiin nolllaksi, ja tämä remanenssivuontiheys poistettua, on materiaalia magnetoitava negatiiviseen suuntaan, koersitiivikentänvoimakkuuteen $-H_c$, joka on esitetty kuvan pisteessä 3. Jos materiaalin magnetointia negatiiviseen suuntaan jatketaan edelleen, saavutetaan pisteeseen 4, joka vastaa pisteen 1 negatiivista kyllästysvuontiheyttä. Jos materiaalia lähdetään magnetoimaan takaisin nollaan pisteestä 4, saavutetaan ensin piste 5, jossa materiaalin magneettivuontiheys vastaa negatiivista remanenssivuontiheyttä $-B_r$. Tämä negatiivinen remanenssivuontiheys saadaan poistettua magnetoimalla materiaalia positiiviseen suuntaan, jolloin päästään pisteeseen 6. Jos ulkoista magneettikenttää kasvatetaan tästä edelleen, päädytään takaisin pisteeseen 1. [50, 51]

Tämä silmukkamainen käyrä tunnetaan hystereesisilmukkana ja tällaista ilmiötä, jossa magneettivuon tiheys B ei ole riippuvainen magneettikentän voimakkuudesta H alkuperäisen magnetoitumiskäyrän mukaisesti, kutsutaan hystereesi-ilmiöksi. Hystereesi-ilmiö aiheutuu alkeismagneettien välisestä kitkasta ja se osoittaa, että ferromagneettisten materiaalien permeabiliteetti riippuu suuresti magneettivuon tiheydestä, eikä ole siis vakio. [50, 51]

6.3.2 Hystereesihäviöiden muodostuminen

Kuten kappaleessa 4.2 todettiin, ferromagneettinen materiaali koostuu useista, eri suuntiin magnetoituneista Weissin-alueista. Kun ferromagneettista materiaalia magnetoidaan vaihtuvalla magneettivuon tiheydellä, hystereesisilmukan mukaisesti (kuva 25) Weissin-alueet pyrkivät järjestäytymään uudelleen, vallitsevan magneettikentän suuntaisesti. Kun magneettikentän voimakkuus H pienenee, magneettivuon tiheys B alenee hitaammin kuin kenttää kasvatettaessa. [47, 9, 51] Tästä syntyy energiaa kuluttavaa kitkaa, joka siten lämmittää sähkökoneen staattori- ja roottorilevyistä koostuvaa rautasydäntä. [50, 52] Tämä hystereesisilmukan kiertämisessä syntyvä lämpöenergia, eli hystereesihäviö, on verrannollinen hystereesisilmukan pinta-alaan. [9, 50, 51, 52] Tästä johtuen, ferromagneettisen materiaalin hystereesihäviöiden suuruus riippuu lähinnä materiaalin koersitiivista H_c ja hystereesisilmukan korkeudesta.

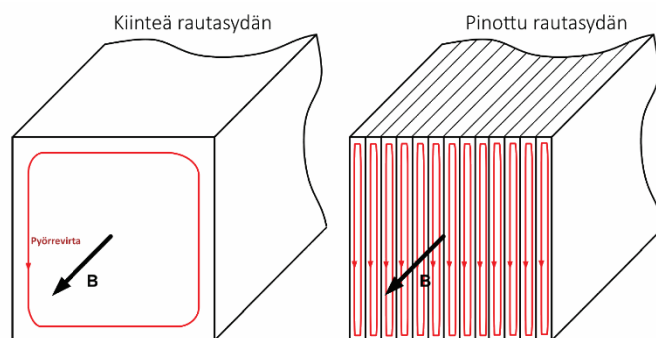
6.3.3 Pyörrevirtahäviöiden muodostuminen

Vaihtelevassa magneettikentässä olevan ferromagneettisen kappaleen eri kohtiin muodostuu suljettuja johdinsilmukoita, joiden sisälle vaihtuva magneettivuo synnyttää kappaleessa kulkevia pyörrevirtoja. Nämä pyörrevirrat vastustavat magneettivuon muuttumista, jolloin magneettivuo jää virrasta jälkeen. Näin ollen pyörrevirrat muodostavat kappaleessa kulkiessaan häviöitä, jotka siten lämmittävät rautasydäntä. [6, 9, 50, 51] Pyörrevirtahäviöt kasvattavat ferromagneettisen materiaalin koersitiivikentän voimakkuutta, joka siten leventää materiaalin hystereesisilmukkaa. [9]

6.3.4 Rautahäviöiden vähentäminen

Materiaalin hystereesisilmukan pinta-alalla on merkittävä vaikutus rautahäviöiden suuruuteen, minkä vuoksi hystereesisilmukkaa suurentavan materiaalin koersiviteetin tulee olla mahdollisimman pieni. Koersiviteettiin vaikuttavat lähinnä materiaalin epäpuhtaudet ja raekoko. Materiaalin koersiviteetti pienenee, kun raekoko kasvaa. Tämä selittyy sillä, että hienojakoisempi materiaali sisältää enemmän raerajoja, jotka hankaloittavat Weissin-alueiden siirtymistä, josta taas seuraa materiaalin koersiviteetin kasvaminen. Koersiviteetti leventää materiaalin hystereesisilmukkaa, jolloin syntyvien rautahäviöiden määrät kasvavat. Materiaalin epäpuhtaudet hankaloittavat myös Weissin-alueiden siirtymistä, ja kasvattavat myös siten materiaalin koersiviteettiä ja hystereesisilmukan pinta-alaa. [46, 8, 47]

Useimmiten sähköteräslevyjen pintaan poltetaan valssaamon hehkutusvaiheen aikana ohut fosfaatti- tai silikaattieristekerros, jonka tehtävänä on estää pyörrevirtojen eteneminen rautasydämen aksiaalisessa suunnassa. [7, 46, 9, 51] Sähkökoneiden rautasydämet valmistetaan pinoamalla useita, yleensä 0,35 mm tai 0,50 mm:n paksuisia, eristettyjä sähkölevyjä yhteen kuvan 26 mukaisesti. Näin pyörrevirtojen kulkutiet katkeavat, ja syntyvät pyörrevirtahäviöt saadaan poistettua lähes kokonaan. [7, 46, 8, 51] Pyörrevirtojen määrät pienenevät levyn paksuuden ohentuessa, mistä johtuen teollisuudessa onkin ollut jo pitkään kasvavana trendinä valmistaa sähkökoneiden rautasydämet mahdollisimman ohuesta sähköteräksestä. [7, 46, 8, 9]



Kuva 26. Kiinteän ja pinotun rautasydämen ero pyörrevirtojen muodostumisen näkökulmasta. Pyörrevirrat on esitetty kuvassa punaisilla viivoilla. Magneettivuontiheys B on kohtisuorassa ytimen pintaan nähden. [46]

Teräksen pii-pitoisuuden kasvattaminen vähentää sähköteräksessä olevien epäpuhtauksien määrää sekä kasvattaa sen raekokoa. Näin ollen piin seostaminen alentaa ensisijaisesti sähköteräksen hystereesihäviöiden määrää. [46, 8] Pii-pitoisuuden kasvattaminen alentaa myös sähköteräksen magneettista anisotropiaa, mikä johtaa materiaalin permeabiliteetin kasvamiseen. [7, 44, 46] Tämän lisäksi piin seostus nostaa materiaalin ominaisvastusta. [44, 46, 8, 52] Materiaalissa olevat pyörrevirrat pienyvät materiaalin johtavuuden pienentyessä, jolloin materiaalin ominaisvastuksen kasvattaminen pienentää syntyvien pyörrevirtahäviöiden määrää. [52] Pii-pitoisuuden kasvattaminen kuitenkin haurastuttaa ja kovettaa terästä, jolloin sähköteräksen valssaaminen levyksi vaikeutuu. Tästä johtuen piitä voidaan seostaa sähköteräkseen maksimissaan 3,25 %, mikäli sähköteräs valmistetaan perinteisellä valssaustekniikalla. [6, 7, 8] Sähköteräksen pii-pitoisuus voidaan maksimissaan nostaa 6,5 %:iin asti, jolloin muun muassa sähköteräksen permeabiliteetti kasvaa suurimpaan arvoon ja teräksen magnetostriktio saadaan mahdollisimman pieneksi. Tällöin sähköteräksen valmistusprosessi on erilainen vähemmän seostettuihin sähköteräksiin verrattuna. Näitä valmistustapoja on käsitelty kirjallisuudessa varsin laajasti, esimerkiksi Verbeken et al. [44] ja Haiji et al. [54] artikkeleissa. [44, 8, 54]

Valtaosa rautahäviöistä syntyy kuitenkin sähköteräksen jatkokäsittelyvaiheissa, erityisesti leikkausprosessissa. Leikkausprosessin vaikutusta sähköteräksen magneettisiin ominaisuuksiin käsitellään tarkemmin kappaleessa 7.3

7. Jännityksen vaikutus sähkölevyn magneettisiin ominaisuuksiin

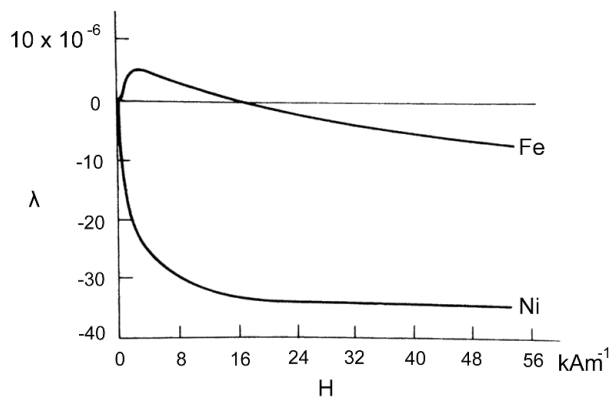
Tässä luvussa käsitellään jännityksen vaikutusta ferromagneettisen materiaalin magneettisiin ominaisuuksiin. Aluksi esitellään yleisesti magnetostriktio-ilmiö, jonka jälkeen käsitellään mikrojäännösjännitysten ja plastisen muodonmuutoksen vaikutus magneettisiin ominaisuuksiin. Lopuksi käsitellään leikkausprosessin vaikutus sähkölevyn magneettisiin ominaisuuksiin ja rautahäviöiden muodostumiseen.

7.1 Magnetostriktio

Magnetostriktiolla λ tarkoitetaan ferromagneettisen materiaalin ominaisuutta, jossa materiaalin fyysiset mitat muuttuvat vähitellen ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta. [7, 47] Ilmiön havaitsi ensimmäisen kerran James Joule vuonna 1842 osoitettuaan, että ohut rautatanko saadaan venymään hieman, kun sitä magnetoidaan tangon pitkittäissuuntaisesti pienessä magneettikentässä. Magnetostriktio aiheutuu pääosin materiaalin Weissin-alueiden kiertymisestä magneettikentän suuntaan, mikä aiheuttaa materiaalin dimensioiden muuttumisen. [7]

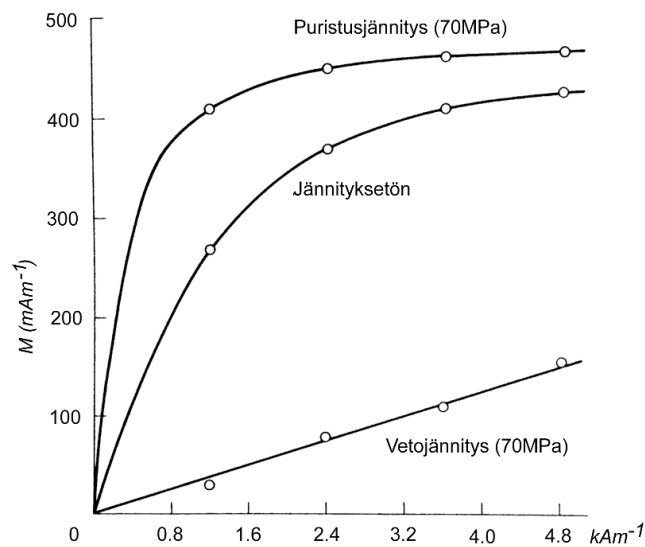
Tavallisesti magneettisten materiaalien magnetostriktiivinen myötymä on pientä, mutta ilmiön olemassaolon avulla voidaan osoittaa, että mekaanisella jännityksellä pystytään muuttamaan materiaalin Weissin-alueiden muotoa sekä muodostamaan materiaaliin magneettisesti anisotrooppisia alueita, joilla on taas merkittävä vaikutus materiaalin permeabiliteettiin ja remanenssiin. Remanenssilla tarkoitetaan sellaista tilannetta, jossa voimakkaassa magneettikentässä oleva ferromagneettinen materiaali jää magneettiseksi, kun ulkoinen magneettikenttä poistetaan. [7]

Kuvassa 27 on esitetty magnetostriktion yhteys monikiteisen raudan (Fe) ja nikkelin (Ni) magneettikentän voimakkuuteen H . Kuvasta nähdään, että nikkelin magnetostriktio on negatiivinen. Raudan magnetostriktio on taas aluksi positiivinen pienessä magneettikentässä, josta se muuttuu vähitellen negatiiviseksi magneettikentän kasvaessa. Tästä syystä raudan magneettisen käyttäytymisen tarkastelu jännityksen alaisena on hieman monimutkaisempaa esimerkiksi nikkeliin verrattuna. [7]



Kuva 27. Magnetostriktion vaikutus monikiteisen raudan (Fe) ja nikkelin (Ni) magneettikentän voimakkuuteen. [7, muokattu lähteestä]

Cullity et al. [7] tutkimustulokset osoittavat, että materiaalin magnetostriktiolla λ on merkittävä vaikutus ferromagneettisen materiaalin magneettiseen käyttäytymiseen jännityksen alaisena. Kuvassa 28 on esitetty veto- ja puristusjännityksen vaikutus monikiteisen nikkelin $M-H$ magnetointikäyrässä. Kuvasta nähdään, että 70 MPa:n puristusjännitys lähes kaksinkertaistaa nikkelin permeabiliteetin μ , kun taas 70 MPa:n vetojännitys pienentää sen noin kymmenesosaan jännityksettömään arvoon verrattuna. Tämänkaltaisen käyttäytyminen on tavallista myös muille ferromagneettisille materiaaleille, riippuen siitä, onko materiaalin magnetostriktio positiivinen vai negatiivinen. Nikkelin magnetostriktio on negatiivinen, kuten kuvasta 27 nähdään. Mikäli materiaalin magnetostriktio on positiivinen, jännityksien luonne muuttuu käänteiseksi, eli tällöin vetojännitys kasvattaa permeabiliteettia ja puristusjännitys pienentää sitä. Eli positiivisen magnetostriktion omaava materiaali venyy, kun sitä magnetoidaan. Tällöin siis materiaalin kohdistuva vetojännitys, joka venyttää materiaalia, myös parantaa sen magnetoitumaa. Vastaavasti materiaaliin kohdistuva puristusjännitys pienentää materiaalin magnetoitumaa. Tämä pätee aina, kun materiaalin magnetoituma M ei ole nolla. [7]



Kuva 28. Kuvassa nähdään 70 MPa vetojännityksen ja 70 MPa puristusjännityksen vaikutus monikiteisen nikkelin (Ni) magnetointikäyrään. [7, muokattu lähteestä]

7.2 Jäännösjännitysten vaikutus raudan magneettisiin ominaisuuksiin

Kappaleessa 6.2 mainittiin, että Weissin-alueiden siirtymistä vaikeuttavat materiaalin epäpuhtaudet sekä sisäiset jännitykset. Näistä merkittävimmät ovat materiaalissa olevat sulkeumat sekä mikrojäännösjännitykset. [7, 8]

Magneettisesta näkökulmasta tarkasteltuna materiaalin sulkeumat ovat sellaisia alueita, jotka magnetoituvat eri tavalla (tai eivät magnetoitu lainkaan) niitä ympäröivään materiaaliin verrattuna. Sulkeumat vaikeuttavat Weissin-alueiden liikettä, koska Blochin-seinämät takertuvat niihin, jolloin Weissin-alueet, ja samalla niiden energia, pienenevät. [7, 8]

Materiaaliin muodostuu mikrojäännösjännityksiä aina, kun siihen vaikuttaa tasainen veto- tai puristusjännitys. Mikrojäännösjännitykset esiintyvät tavallisesti materiaalissa samanaikaisesti makrojäännösjännitysten kanssa. Erona näiden kahden välillä on se, että mikrojäännösjännitykset ovat kooltaan pienempiä ja niiden poistaminen kokonaan esimerkiksi lämpökäsittelyn avulla ei ole mahdollista. Tämä johtuu siitä, että mikrojäännösjännitykset aiheutuvat pääosin materiaalin dislokaatioiden olemassaolosta, ja niiden poistaminen monikiteisestä materiaalista on mahdotonta. Useimmiten mikrojäännösjännitykset ovat kooltaan pienempiä, tai samansuuruisia, materiaalin

raekokoon verrattuna. Lisäksi ne saattavat muuttaa kokoaan ja jopa vaihtaa varautumistaan hyvinkin nopeasti. [7]

Tavallisesti dislokaatiota ympäröivän jännityskentän halkaisija on pienempi Blochin-seinämän leveyteen verrattuna, jolloin dislokaatioviiva ei ole samansuuntainen Blochin-seinämän muodostaman tason kanssa. Tästä johtuen yksittäisten dislokaatioiden ja liikkuvien Blochin-seinämien välille muodostuu mikrojäännösjännityksiä. [7]

Mikrojäännösjännitykset vaikeuttavat Blochin-seinämien liikkumista materiaalisissa tapahtuvan magnetostriktion vaikutuksesta. Magnetostriktio aiheuttaa materiaalisissa tilavuuden muutoksia sekä muuttaa materiaalin magnetoinnin suuntaa. Kun tämä vääristymä on vuorovaikutuksessa materiaalisissa olevien jännitysten kanssa, Blochin-seinämien liike estyy, jolloin ne jäävät alkuperäisille paikoilleen. [7]

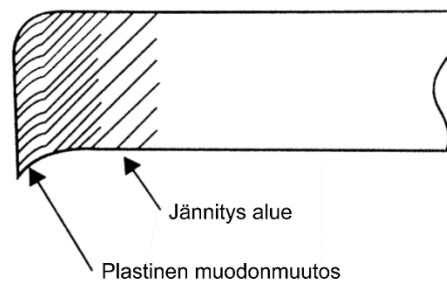
Mikrojäännösjännityksiä pääsee muodostumaan myös silloin, kun ferromagneettinen materiaali jäädytetään sen Curie-lämpötilan alapuolelle. Tällöin materiaalisissa tapahtuu spontaania magnetostriktiota eri Weissin-alueilla ja eri suunnissa, jolloin yksittäiset Weissin-alueet eivät pääse vapaasti muodostumaan. Näin ollen yksittäisen Weissin-alueen sisällä oleva jännitystilasta poikkeaa sen ympärillä olevien alueiden jännityksistä, jolloin alueiden välille muodostuu mikrojännityksiä. [7]

7.3 Meistoleikkauksen vaikutus sähkölevyn magneettisiin ominaisuuksiin

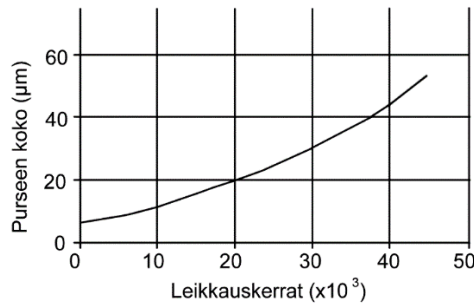
Materiaaliin muodostuu meistoleikkauksesta suurta plastista muodonmuutosta, sekä tästä aiheutuvaa myötölujittumista. Nämä taas aiheuttavat kappaleeseen sisäisiä jännityksiä ja dislokaatiitiheyden kasvamista, mitkä vaikeuttavat Weissin-alueiden siirtymistä. [7, 8] Tällöin materiaalin magnetointikäyrä ja hystereesisilmukka madaltuvat, täysin hehkutettuun sähkölevyyn verrattuna. Lisäksi materiaalin koersiviteetin kasvaminen leventää sen hystereesisilmukkaa, jolloin materiaalin hystereesihäviöt kasvavat ja materiaalin permeabiliteetti alenee. [7]

Kuvassa 29 on esitetty havaintokuva staattorihampaan jännitystilasta meistoleikkauksen jälkeen [8]. Plastinen muodonmuutosalue ulottuu tavallisesti noin 0,3 mm:n päähän leikkausreunasta, mutta leikkausprosessissa syntyvän jännitysalueen kokonaisvaikutus ulottuu kuitenkin noin 10 mm:n päähän leikkausreunasta. [8, 9, 55, 56] Lisäksi

meistoleikkauksessa syntyy lähes aina purseeta, jolla on heikentävä vaikutus materiaalin magneettisiin ominaisuuksiin. Purse on levyn leikkausreunassa oleva pieni, terävä uloke, joka saattaa rikkoa sähkölevyn eristekerroksen rautasydämen pinoamisvaiheessa. Mikäli eristepinnoite rikkoutuu, pyörrevirrat pääsevät kulkemaan vierekkäisten sähkölevyjen välillä, jolloin rautasydämeen pääsee syntymään ylimääräistä pyörrevirtahäviötä. [8, 56, 57] Kuvassa 30 on esitetty 0,3 mm:n paksuisen kidesuunnatun sähköteräksen purseen korkeuden riippuvuus käytetyn terän leikkauskertojen määrästä. Kuvasta nähdään, että purseen korkeus kasvaa teränkulumisen myötä leikkauskertojen lisääntyessä. [8] Samanlaiseen tulokseen päädyttiin myös Harstick et al. [57] tutkimuksessa, jossa vertailtiin myös työkalun kulumisen vaikutusta purseen korkeuteen. Testimateriaalina käytettiin 0,30 mm:n paksuista kidesuunnatonta sähköterästä. Terävällä meistoleikkaimella purseen korkeudeksi mitattiin alle 5 µm, puoliksi tylsällä noin 40 µm ja täysin kuluneella terällä 60 µm. [57] Tästä johtuen sähkölevyn meistoleikkaimen terien kuluminen on pidettävä pienenä, sekä yhtä lailla leikkausvälin tulee olla sopiva, jotta vältetään ylimääräisten pyörrevirtahäviöiden muodostumiselta.

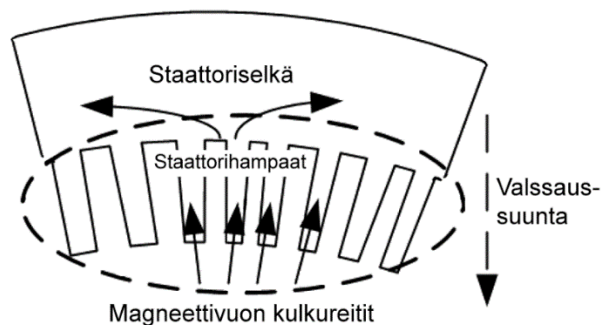


Kuva 29. Jännitysalue staattorihampaassa. [8]



Kuva 30. Kuvassa on esitetty 0,30 mm:n paksuisen kidesuunnatun sähköteräksen purseen korkeuden suhde käytetyn terän leikkauskertojen määrään. [8, muokattu lähteestä]

Jännitysalueen heikentävä vaikutus korostuu entuudestaan, mikäli leikattava kappale on geometrialtaan pieni, kuten esimerkiksi yksittäinen staattorihammas. Tällöin on erityisen tärkeää huomioida meistoleikkaimen terien kunto, sekä tämän lisäksi sähkölevyn leikkaussuunta. [8, 58] Arshad et al. [58] tutkimuksessa verrattiin leikkaussuunnan vaikutusta syntyvien rautahäviöiden määrään. Tutkimuksessa todettiin, että leikattaessa sähkölevyä valssaussuunnassa, leikkausprosessissa muodostuvan jännitysalueen heikentävä vaikutus materiaalin magneettisiin ominaisuuksiin on pienempi verrattuna valssaussuuntaan nähden kohtisuorassa leikattuihin levyihin. [58] Vastaavanlaiseen tulokseen päädyttiin myös muun muassa Paltanea et al. tutkimuksessa [59]. Tavallisesti staattorilevyn magneettivuon tiheys on suurin staattorihampaassa ja pienempi staattoriselässä [58, 60], mistä johtuen staattorilevyn meistoleikkausprosessi on suunniteltava siten, että staattorihampaat leikataan valssaussuunnassa ja staattoriselkä kohtisuorassa valssaussuuntaan nähden, kuten kuvassa 31 on esitetty. [58]



Kuva 31. Tavallisesti staattorihampaat leikataan valssaussuunnassa ja selkä kohtisuorassa valssaussuuntaan. [58, muokattu lähteestä]

Arshad et al. [58] tutkimuksessa verrattiin myös meistoleikkaimen terien kulumisen vaikutusta syntyvien rautahäviöiden määrään. Tutkimuksessa todettiin, että leikattaessa täysin terävällä meistoleikkaimella, rautahäviöiden määrät olivat jopa 4 % pienempiä valmistajan antamiin katalogiarvoihin verrattuna. Kun sähkölevyä leikattiin kuluneella työkalulla syntyvien rautahäviöiden määrät olivat noin 6 %:ia suuremmat valmistajan antamiin arvoihin verrattuna. [58] Harstick et al. [57] tutkimuksessa osoitettiin, että täysin kulunut terä kasvatti materiaalin koersiviteettikentän voimakkuutta jopa 10 % terävällä leikkaimella leikattuun materiaaliin verrattuna. [57]

Meistoleikkauksessa syntyviä jännityksiä voidaan poistaa lämpökäsittelyllä, esimerkiksi hehkuttamalla materiaalia muutaman minuutin ajan 800 °C:ssa, jolloin myös osa materiaalin magneettisista ominaisuuksista saadaan palautettua alkuperäiselle tasolle. [7, 8] Mikäli käytettävä kidesuunnaton sähköteräs on täysijalostettua, sille tarvittavat lämpökäsittelyt on suoritettu jo terästehtaalla, eikä sille näin ollen suoriteta leikkauksen jälkeistä lämpökäsittelyä. [45] Tämän lisäksi, jos sähköteräksen pinnoite on orgaanista yhdistettä, sille ei voida suorittaa jännityksenpoistohehkutusta, sillä pinnoite ei kestä lämpökäsittelyä. [7]

8. Elementtimallintaminen

Tässä luvussa esitellään yleisellä tasolla elementtimenetelmän toimintaperiaate. Lisäksi käsitellään suurten muodonmuutosten tarkastelussa käytettävä epälineaarinen elementtimenetelmä.

8.1 Elementtimenetelmä

Valtaosa mekaniikan ongelmista kuvataan erilaisilla differentiaali- tai integraaliyhtälöillä, joiden ratkaiseminen analyttisesti on hyvin haastavaa tai jopa mahdotonta. Tämän vuoksi ongelmien ratkaisuun käytetään numeeriseen ratkaisumenetelmään perustuvaa elementtimenetelmää, jonka avulla lasketaan likiarvot näiden differentiaali- tai integraaliyhtälöiden ratkaisusta. [61, 62] Elementtimenetelmää voidaan soveltaa mekaniikan ongelmien lisäksi myös muun muassa erilaisiin virtaus-, lämmönsiirto- ja sähkömagneetiikan ongelmiin. [63]

Elementtimenetelmässä tarkasteltava ongelma-alue pilkotaan pieniin osiin, elementteihin, joiden käyttäytyminen yksitellen on laskettavissa numeerisesti. Nämä elementit muodostuvat taas solmuista ja elementin reunoista. Elementit muodostavat elementtiverkon, joka voi olla joko yksi-, kaksi- tai kolmidimensioinen. Menetelmässä solmuarvot oletetaan tunnetuiksi ja solmupisteiden väleille tulevat arvot saadaan interpoloimalla näitä tunnettuja solmuarvoja. [27, 61, 62, 64] Elementistä toiseen jatkuvuus tapahtuu solmupisteiden kautta. Jatkuvuus voi olla joko lineaarista, kvadraattista tai korkeampaa astetta olevaa. Elementtiä valittaessa on tiedettävä, että jatkuuko itse ilmiö, vai sekä ilmiö että sen derivaatta, tai näiden lisäksi myös toinen derivaatta. [27] Ongelman ratkaisun laatua voidaan parantaa kasvattamalla tarkastelualueella olevien elementtien määrää eli käyttämällä hienompaa elementtiverkkoa. Useimmiten hienompaa elementtiverkkoa käytetään sellaisilla alueilla, joissa tapahtuu eniten muutoksia. Hienomman elementtiverkon käyttäminen kuitenkin kasvattaa tarvittavaa laskenta-aikaa, mikä on hyvä huomioida simulaation suunnitteluvaiheessa. [61, 62, 64]

Elementtimenetelmää muodostaessa kootaan aluksi kaikki fysikaalista ongelmaa kuvaavat perusyhtälöt, kuten liikeyhtälöt tai tasapainoyhtälöt. Näitä yhtälöitä kutsutaan

vahvaksi muodoksi. Tämän jälkeen vahva muoto muutetaan heikoksi muodoksi, mikä on esitetty esimerkiksi Belytschko T et al. [65] teoksessa [27, 65]. Seuraavaksi määritetään ratkaisuun tarvittavat ongelman reunaehdot eli ne yhtälöt, jotka kuvaavat systeemille asetettuja rajoitteita siinä esiintyvien fysikaalisten muuttujien, kuten liikkeen, jännityksen ja lämpövirtauksen suhteen. Lopulta simulaatio suoritetaan elementtimallinnus ohjelmistolla. [27, 65]

Ajasta riippuvat yhtälöt ratkaistaan käyttämällä numeerisia aikaintegraatiomenetelmiä, joita ovat implisiittinen ja eksplisiittinen aikaintegrointi. Implisiittinen aikaintegrointi ratkaisee yhtälöjoukon iteroimalla, kun taas eksplisiittinen aikaintegrointi ratkaisee kiihtyvyydet suoraan olettamalla, että massamatriisi on diagonaalinen. [27, 65]

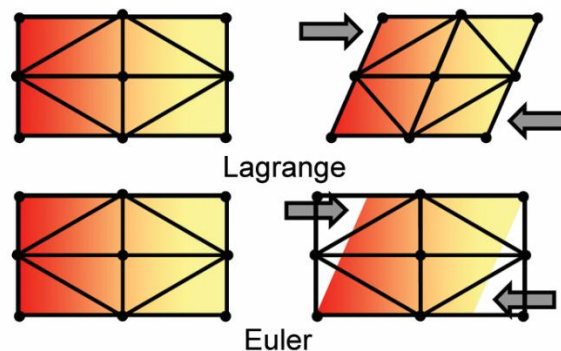
Elementtimenetelmä soveltuu lähinnä käytettäväksi materiaalin kimmoisen alueen tarkasteluun. Mikäli materiaalissa esiintyy työstön aikana suuria muodonmuutoksia tai murtumista, jolloin materiaalin myötölujuus ylitetään, materiaalin elementtimallinnus tapahtuu epälineaarisen elementtimenetelmän avulla, jota käytetäänkin laajalti ohutlevytöiden simuloinnissa. [27, 62, 65, 66]

8.2 Epälineaarinen elementtimenetelmä

Epälineaarisen elementtimenetelmän vaiheet koostuvat mallin muodostamisesta, perusyhtälöiden kokoamisesta, yhtälöiden diskretoinnista, yhtälöiden ratkaisemisesta ja ratkaisujen tulkitsemisesta. Menetelmän vaiheista ainoastaan mallin muodostaminen ja ratkaisujen tulkitseminen ovat simulaatiokäyttäjän tehtäviä, loppujen ollessa ohjelmistokehittäjien käsissä. Simulaatiokäyttäjän on kuitenkin tärkeää ymmärtää perustiedot elementtimenetelmän toiminnasta, jotta ratkaisuja ei tulkita virheellisesti. [65] Yhtälöt ratkaistaan numeerisilla menetelmillä, useimmiten Newton-Raphson-menetelmällä [66], mutta on huomioitava, että ratkaisujen tulkinta on kuitenkin sovelluskohtaista.

Materiaalipisteen sijainti malliavaruudessa voidaan ilmaista Eulerin tai Lagrangen koordinaatistojen avulla tai näiden yhdistelmällä, ALE-menetelmällä (*Arbitrary Lagrangian Eulerian*). Eulerin ja Lagrangen menetelmät eroavat toisistaan kuvan 32 mukaisesti siten, että Lagrangen menetelmässä elementtiverkko deformatuu materiaalin mukana, kun taas Eulerin menetelmässä materiaali deformatuu elementtiverkon sisällä,

jolloin elementtiverkko ei deformoidu materiaalin mukana. Lagrangen menetelmällä tapahtuvaa muutosta kuvataan vertaamalla tarkasteluhetken arvoja alkuperäisiin arvoihin. Eulerin menetelmällä kuvataan taas muutosta paikallaan pysyvistä koordinaatistosta. Eulerin koordinaatit kuvaavat materiaalipisteen sijaintia tarkasteluhetkellä, kun taas Lagrangen koordinaateilla materiaalipisteen paikka ilmoitetaan deformatumattomassa tilassa. [27, 65, 66]



Kuva 32. Kuvassa on esitetty Eulerin ja Lagrangen elementtiverkkojen esitykset deformatumattomassa ja deformatuneessa tilassa. [27]

Lagrangen menetelmä perustuu erillisten materiaalipisteiden seuraamiseen. Menetelmässä elementit on sidottu deformatuvaan kappaleeseen, jolloin elementit seuraavat materiaaliavirtaa. Menetelmässä seurataan yksittäisten elementtien nopeutta ajan funktiona. [27, 65] Kyseisellä menetelmällä ei kuitenkaan saavuteta suurta tarkkuutta teräsarmän ympärillä, eikä toissijaisella leikkausvyöhykkeellä elementtiverkon vääristymien takia. [27]

Eulerin menetelmässä seurataan materiaalipartikkelien sijaan tilavuuksia. Menetelmässä elementit kiinnitetään koordinaatistoon, jolloin materiaalin annetaan virrata elementtiverkon kautta. Menetelmässä nopeutta seurataan elementtien funktiona. Eulerin menetelmässä elementtiverkon tulee ympäröidä tarkasteltava kappale kokonaan. [65] Eulerin menetelmässä vääristymät eivät haittaa laskentaa, mutta menetelmä tarvitsee vapaita pintoja seuraavia algoritmeja ja oletuksia, kuten lastuavassa työstössä tasaisen lastunpaksuuden. Tämä rajoittaa menetelmän käyttöä muun muassa lastuavan työstön tutkimisessa. [27]

ALE-menetelmällä saadaan käyttöön molempien, Eulerin ja Lagrangen, menetelmien edut, jolloin elementtien reunat deformatuvat, mutta sisäelementit säilyttävät muotonsa.

Tällöin elementtiverkon vääristyminen saadaan minimoitua, mikä onkin Lagrangen menetelmän suurin haittapuoli, erityisesti ongelmien kohdalla, jotka sisältävät suuria muodonmuutoksia. Elementtien vääristymät erityisesti leikkausprosessia simuloitaessa voidaan ratkaista jatkuvalla uudelleen verkottamisella. Verkottaminen tapahtuu uudestaan, kun elementtien vääristymät saavuttavat tietyn määritetyn arvon. [67, 65]

Tässä työssä leikkausprosessin mallintamiseen käytetään Ohiossa perustetun yrityksen ”Scientific Forming Technologies Corporation” kehittämää Deform-elementtimallinnusohjelmistoa. Deform on yksi maailman käytetyimmistä metallien muovaavaan työstöön tarkoitetuista elementtimallinnusohjelmistoista. Tämän lisäksi ohjelman avulla voidaan mallintaa muun muassa metallien lämpökäsittelyprosessia. Ohjelmisto on Lagrangen formuloinnilla toteutettu, implisiittiseen aikaintegrointiin perustuva elementtiratkaisija. Ohjelmistolla elementtimallinnus voidaan suorittaa joko kaksi- tai kolmiulotteisena. [27, 68]

9. Materiaalimallin määrittäminen

Sähkölevyn meistoleikkauksesta aiheutuvien jännitysten tutkimista varten laadittiin materiaalimalli käytettävästä koemateriaalista, SFS-EN 10106 standardin mukaisesta M400-50A-sähköteräksestä, Deform-elementtimallinnusohjelmistoa varten. Tässä luvussa esitellään koemateriaalina käytetty M400-50A-sähköteräs sekä käydään läpi materiaalimallin muodostaminen.

9.1 Koemateriaali

Työssä koemateriaalina käytettiin M400-50A sähköterästä. Materiaali on SFS-EN 10106 standardin mukaisesti 0,5 mm paksua, täysijalostetussa tilassa olevaa, kidesuunnatonta sähköterästä, jonka häviöteho 1,5 T:n huippuvuontiheydellä ja 50 Hz:n taajuudella on maksimissaan 4,0 W/kg. [45]

Taulukossa 1 on esitetty keskiarvot M400-50A-sähköteräksen mekaanisista ominaisuuksista kolmen eri sähköteräsvalmistajan, ruotsalaisen *Cogent Surahammars Bruks AB*:n [69], luxemburgilaisen *Aperam S.A.*:n [70] ja japanilaisen *JFE Steel Corporationin* [71], antamien tietojen perusteella. Mekaaniset ominaisuudet on mitattu materiaalin valssaussuunnassa (RD). Sähköteräsvalmistajan *Cogent Surahammars Bruks AB* mukaan sähköteräksen murto- ja myötölujuuden arvot ovat noin 5 %:ia suuremmat, mikäli materiaali leikataan vastakkaisessa valssaussuunnassa (TD) [69].

Taulukko 1. M400-50A-sähköteräksen mekaaniset ominaisuudet *Cogent Surahammars AB*:n, *Aperam S.A.*:n ja *JFE Steel Corporationin* antamien tietojen perusteella. [69, 70, 71]

Murtolujuus R_m [MPa]	0,2 %- myötöraja $R_{p0,2}$ [MPa]	Murtovenymä [%]*	Kovuus (HV5)**	Kimmokerroin E [MPa]***
450	320	30	160	200 000

*Murtovenymä laskettu keskiarvona *Aperamin* ja *JFE Steel Corporationin* antamista arvoista.

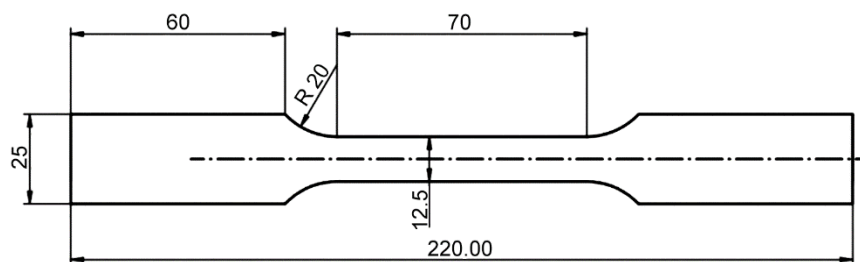
**Kovuus laskettu keskiarvona *Gogent Surahammars Bruks AB*:n ja *Aperamin* antamista arvoista.

***Kimmokerroin on lähteestä *Gogent Surahammars Bruks AB*

9.2 M400-50A-sähköteräksen vetokoe

Meistoleikkauksen simulointia varten määritettiin Deformiin materiaalimalli M400-50A-sähköteräksestä. Materiaalin myötölujittuminen mallinnettiin Hollomonin-yhtälön (14) avulla ja materiaalin vaurioituminen Cockcroft-Latham vauriomallilla (16). Materiaalin lämpenemistä ei otettu huomioon, sillä leikkausprosessissa ei pääse syntymään suuria lämpötilanmuutoksia. Hollomonin-yhtälön parametrit määritettiin yksiakselisesta vetokokeesta.

Koemateriaalista valmistettiin yhteensä kuusi kappaletta kuvan 33 mittojen mukaista vetokoesauvaa siten, että kolme sauvoista leikattiin valssaussuuntaan (RD) ja loput kolme valssaussuunnan vastakkaiseen suuntaan (TD). Vetokoesauvat valmistettiin leikkaamalla giljotiinilla ohutlevyrainasta 220 mm pitkiä ja 25 mm leveitä sauvoja. Koesauvojen kavennetun kohdan leveys oli 12,5 mm ja se valmistettiin lankasahaamalla. Lankasahaus ei aiheuta materiaaliin ylimääräisiä muodonmuutoksia. Tämän jälkeen vetokoesauvoille suoritettiin yksiakseliset vetokokeet huoneenlämmössä, SFS-EN ISO 6892-1 standardin [17] mukaisesti, MTS Insight Electromechanical vetokoelaitteistolla, jonka maksimikuormituskapasiteetti oli 30kN:ia. Vetokokeessa syntyvät venymät mitattiin vetokokeen aikana koesauvaan kiinnitetyn ekstensiometrin avulla. Vetonopeudeksi määritettiin 0,035 mm/s.



Kuva 33. Yksiakselisen vetokokeen vetokoesauvan mitat.

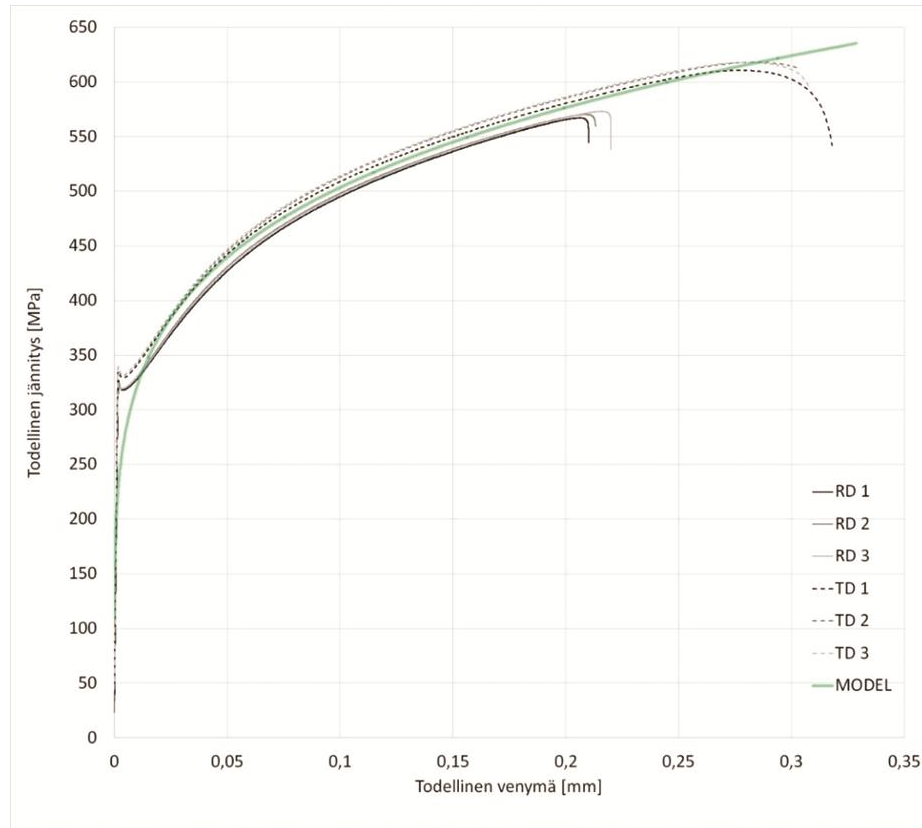
Vetokokeesta saadut insinöörivenymät ja -jännitykset muutettiin todellisiksi venymiksi ja jännityksiksi yhtälöiden (3) ja (4) avulla. Taulukossa 2 on esitetty keskiarvot todellisen jännityksen ja venymän avulla lasketuista murtolujuuden, myötörajan ja kimmokertoimen arvoista valssaussuunnassa leikatuille (RD) koesauvoille sekä vastakkaisessa valssaussuunnassa (TD) leikatuille sauvoille. Tuloksista nähdään, että

materiaalin murtolujuus on noin 8 % suurempi, myötöraja noin 3 % suurempi ja kimmokerroin noin 10 % suurempi valssaussuunnan vastakkaisessa suunnassa. Ruotsalaisen sähköteräsvalmistajan *Cogent Surahammars Bruks AB:n* [69] mukaan murto- ja myötölujuuden arvot ovat vastakkaisessa valssaussuunnassa noin 5 % suuremmat. Saatuja mittaustuloksia voidaan pitää onnistuneina, sillä saadut keskiarvot laskettiin samasta levyrainasta leikatuista koesauvoista, jolloin ei voitu huomioida eri valmistuserien välistä eroavaisuutta. Koemateriaalista määritetty murtolujuus on 120 MPa suurempi taulukossa 1 esitettyihin arvoihin verrattuna (arvot valssaussuunnan mukaiset). Valmistajien antavat arvot ovat usein keskiarvoja useamman valmistuserän tuotteista, jolloin yksittäisten valmistuserien väliltä löytyy hieman eroavaisuutta. Sähköteräksien kannalta materiaalin magneettiset ominaisuudet ovat tärkeämmät, minkä vuoksi niiden tulee täyttää sähköteräs standardin mukaiset arvot. Koemateriaalista mitattu myötöraja ja kimmokerroin vastaavat hyvin valmistajien keskiarvoa. Tässä työssä ei mitattu koemateriaalin kovuutta.

Taulukko 2. Yksiaksisiaalisen vetokokeen todellisista jännityksistä ja venymistä laskettujen murtolujuuden, myötöran ja kimmokertoimen keskiarvot valssaussuunnassa ja vastakkaiseen valssaussuuntaan leikatuille sähkölevyille.

	Murtolujuus R_m [MPa]	0,2 %-myötöraja $R_{p0,2}$ [MPa]	Kimmokerroin E [MPa]
RD	570	320	190 000
TD	615	330	210 000

Kuvassa 34 on esitetty materiaalin todellisista jännityksistä ja venymistä laskettu materiaalin todellinen jännitys-venymäkäyrä. Kuvaajassa on esitetty kolmen valssaussuuntaan leikattujen (RD) sauvojen, kolmen vastakkaiseen valssaussuuntaan (TD) leikattujen sauvojen sekä sovitetun Hollomonin-mallin (model) jännitys-venymäkäyrä. Kuvaajasta nähdään myös, että vastakkaisessa valssaussuunnassa leikattujen sähköteräksien mekaaniset ominaisuudet ovat hieman korkeammat valssaussuuntaan leikattuihin koesauvoihin verrattuna. Deform-ohjelmistossa materiaalin käyttäytymistä mallinnettiin sovitetun Hollomonin-mallin jännitys-venymäkäyrällä.



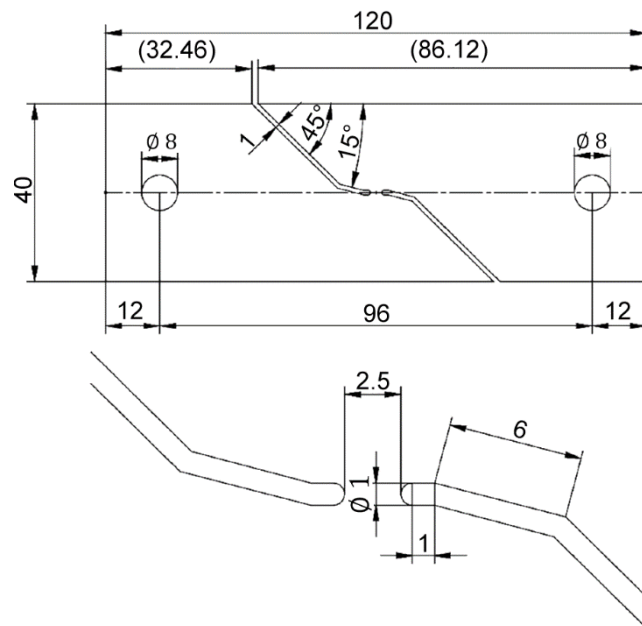
Kuva 34. Yksiaksaalisesta vetokokeesta mitattu jännitys-venymäkäyrä. Kuvassa on esitetty kolmen valssausuuntaan leikatun sähkölevyn (RD) ja kolmen vastakkaiseen valssausuuntaan leikatun (TD) koesauvan sekä sovitetun Hollomonin-mallin (model) todelliset jännitysvenymäkuvaajat. Hollomonin-mallin kuvaajaa käytettiin materiaalimallin muodostamiseen.

Hollomonin yhtälö (14) sovitettiin saaduista vetokoetuloksista minimoimalla absoluuttista virhettä, jolloin keskimääräiseksi virheeksi saatiin 3 %. Materiaalin lujuuskertoimen K arvoksi määritettiin 789,6 ja materiaalin myötölujittumiseksponentiksi n saatiin 0,195. Tämän lisäksi koemateriaalin vetokoedatasta M400-50A-sähköteräksen poissonin luvuksi ν määritettiin 0,29.

9.3 M400-50A-sähköteräksen leikkausmurtosimulaatio tasojännitystilassa

Koemateriaalille suoritettiin yksiaksaalisen vetokokeen lisäksi leikkausmurtokoe tasojännitystilassa. Kokeessa käytetyn vetokoesauvan geometria suunniteltiin erikseen soveltamalla Tarigopula et al. [28] tutkimuksessa käytettyä geometriaa. Tämä johtui siitä, että Tarigopula et al. tutkimuksessa käytetyn vetokoesauvan geometrialla suoritettu leikkausmurtokoe epäonnistui siten, että koesauva pääsi nurjahtamaan kesken vetokokeen, jolloin digitaalisella kuvantamismenetelmällä (DIC) ei onnistuttu

määrittämään koesauvassa tapahtuvia muodonmuutoksia. Tämä johtui pääosin siitä, että Tarigopula et al. tutkimuksessa käytetty koesauva oli paksuudeltaan 1,5 mm:ia, kun taas tässä työssä käytetyn koesauvan paksuus oli 0,5 mm. Ongelma saatiin ratkaistua yksinkertaistamalla Tarigopula et al. tutkimuksessa käytetyn vetokoesauvan keskikohdan geometriaa, sekä leventämällä koesauvaa 10 mm:ia ja pidentämällä sitä 20 mm:ia. Koesauvan leikkausalueen pituus säilyi kuitenkin samana (2,5 mm). Tässä työssä käytetyn leikkausmurtokokeen koesauvan geometria on esitetty kuvassa 35.

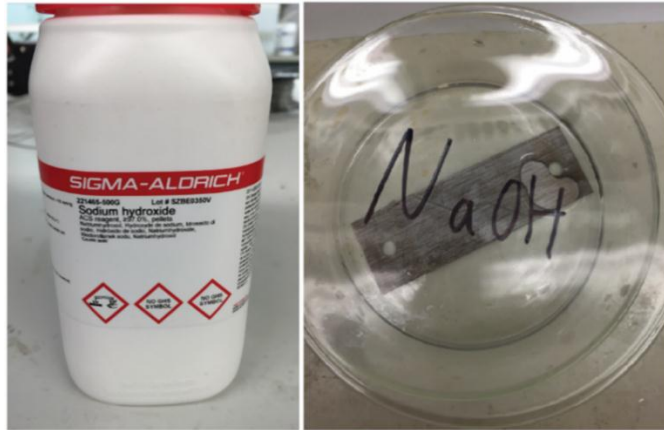


Kuva 35. Leikkausmurtokokeessa käytetyn koesauvan geometria.

Leikkausmurtokokeita varten valmistettiin kaksi koesauvaa kuvan 35 mukaisesti; yksi valssaussuuntaan (RD) ja toinen vastakkaiseen valssaussuuntaan (TD). Koesauvat leikattiin aluksi giljotiinilla 120 mm pitkiksi ja 40 mm leveiksi sauvoiksi. Keskikohdan geometria sekä koesauvan päissä olevat 8 mm:n reiät valmistettiin lankasahaamalla.

Ennen leikkausmurtokoetta koesauvojen pinnalta poistettiin sähköteräksen eristepinnoite, jotta saatiin parempi kontrastiero digitaalista kuvantamismenetelmää (DIC) varten. Eristepinnoite poistettiin liottamalla koesauvoja huoneenlämmössä natriumhydroksidi-liuoksessa (NaOH). Liuos valmistettiin mittaamalla 50 ml vettä keittolasiin ja liuottamalla siihen 50 grammaa 97 %:sta kiinteää natriumhydroksia (*sodium hydroxide*). Tämän jälkeen koesauvoja pidettiin yksitellen liuoksessa noin 15 minuuttia. Tämän

jälkeen koesauvat nostettiin pois liuoksesta ja huuhdeltiin vedellä, minkä jälkeen eristekerros hangattiin pois koesauvojen pinnalta. Lopuksi näytteet huuhdeltiin vedellä ja etanolilla sekä kuivattiin kuivaimella. Kuvassa 36 on esitetty koesauvan liuottaminen natriumhydroksidissa.



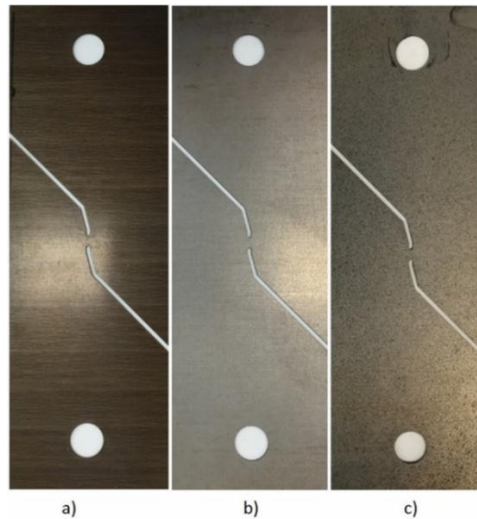
Kuva 36. Leikkausmurtokoesauvan eristepinnoite poistettiin liottamalla koesauvoja natriumhydroksidiliuoksessa.

Tämän jälkeen koesauvojen pintaan muodostettiin satunnainen kuviointi digitaalista kuvantamismenetelmää (DIC) varten. Kuviointi suoritettiin sirottelemalla koesauvojen päälle lasertulostimen mustaa väriä. Musta väri siroteltiin koesauvojen pintaan käyttämällä 0,08 mm:n seulaa (+GF+ DIN4188). Kuviointi poltettiin koesauvojen pintaan uunittamalla koesauvoja 100 °C uunissa (Nabertherm) noin 15 minuutin ajan. Kuvassa 37 on esitetty koesauvan kuviointiin käytetty koejärjestely.



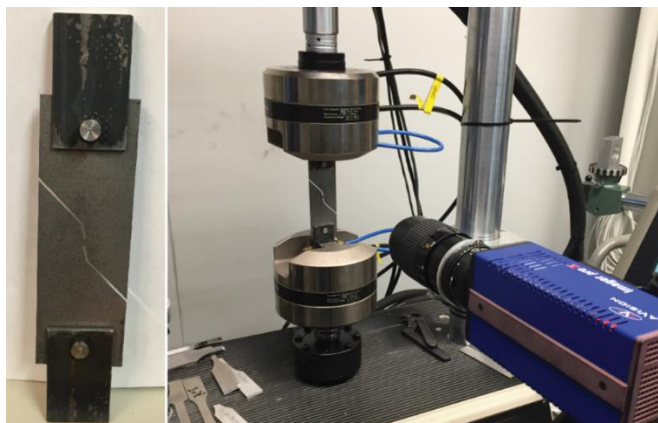
Kuva 37. Leikkausmurtokokeen koesauvojen pintaan muodostettu satunnainen kuviointi valmistettiin sirottelemalla lasertulostimen mustaa väriä koesauvojen pintaan 0,08 mm:n seulalla. Kuviointi poltettiin koesauvojen pintaan uunittamalla koesauvoja 100 °C uunissa noin 15 minuuttia.

Kuvassa 38 on esitetty leikkausmurtokokeen koesauva ennen eristekerroksen poistamista (38a), eristekerroksen poistamisen jälkeen (38b) ja digitaaliseen kuvantamismenetelmään tarvittavan kuvioinnin kera (38c).



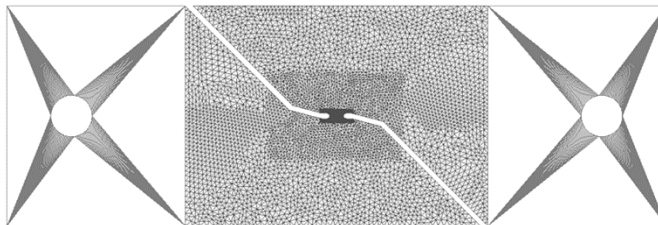
Kuva 38. Leikkausmurtokokeen vetokoesauvat. Kohdassa a) on esitetty koesauva ennen eristepinnoitteen poistamista, kohdassa b) on esitetty koesauva ilman eristekerrosta ja kohdassa c) on esitetty koesauvan pinnalla oleva satunnainen kuviointi digitaalista kuvantamismenetelmää varten.

Leikkausmurtokoe suoritettiin MTS 858-vetokoelaitteistolla, jonka vetonopeudeksi määritettiin 0,01 mm/s. Koesauvat kiinnitettiin vetokoelaitteen vetoleukoihin erikseen valmistettujen kiinnitystappien avulla, jotka kiinnitettiin koesauvaan sahattuihin, halkaisijaltaan 8 mm, reikiin. Kiinnitystappien avulla koesauvat pystyivät liikkumaan vapaasti vetokokeen aikana, jolloin materiaalin murtumis- ja muodonmuutoskäyttäytymistä pystyttiin tarkastelemaan digitaalisen kuvantamis-menetelmän avulla. Digitaalinen kuvantamismenetelmä suoritettiin käyttämällä LaVision Imager Pro X DIC-kameraa, johon oli kiinnitetty Nikonin Micro Nikkor-objektiivi. Kuvassa 39 on esitetty leikkausmurtokokeen vetokoesauva kiinnitystappeineen sekä kokeessa käytetty koelaitteisto.



Kuva 39. Kuvassa on esitetty leikkausmurtokoesauva kiinnitystappeineen sekä käytetty koelaitteisto. Koe suoritettiin MTS 858-vetokoelaitteistolla, johon kiinnitettiin LaVision Imager Pro X-kamera digitaalista kuvantamismenetelmää varten.

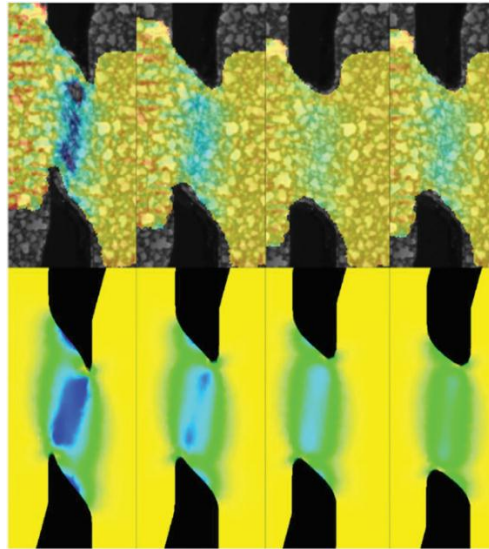
Digitaalisella kuvantamismenetelmällä saadut tulokset analysoitiin DIC-ohjelmistolla. Tämän jälkeen leikkausmurtokokeesta muodostettiin todellisuutta vastaava simulaatiomalli Deform-elementtimallinnusohjelmaan. Kuvassa 40 on esitetty simulaatiossa käytetyn leikkausmurtokokeen simulaatiosauva, johon on mallinnettu satunnainen kuviointi, kuten todellisissa testisauvoissa.



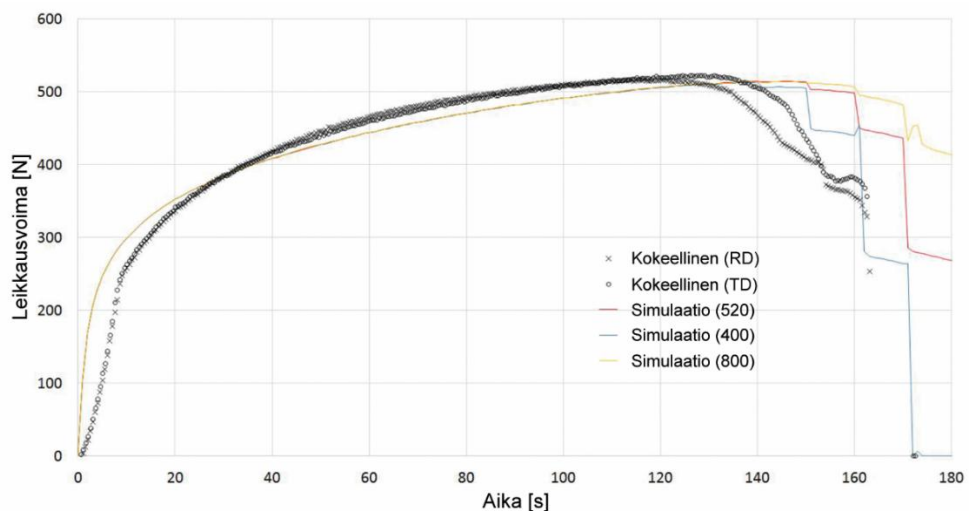
Kuva 40. Simulaatiossa käytetty leikkausmurtokoesauva ja sen kuviointi.

Tämän jälkeen simulaatitulokset määritettiin vastaamaan digitaalisen kuvantamismenetelmän avulla saatuja tuloksia, jolloin materiaalin todellinen murtumis- ja muodonmuutoskäyttäytyminen saatiin mallinnettua myös simulaatiolla. Tämä on esitetty kuvassa 41. Tämän jälkeen määritettiin kokeilemalla Cockroft-Latham-vauriomalliin tarvittava, materiaalin vaurioitumista kuvaava kriittinen arvo C . Kriittinen arvo C määritettiin asettamalla aluksi simulaation alkuarvoksi 520, jonka jälkeen suoritettiin simulaatio. Tämän jälkeen simulaatio suoritettiin käyttämällä hieman suurempaa arvoa (800). Simulaatiosta saadut kuvaajat, joissa kriittisenä arvona käytettiin 520 ja 800 sovitettiin leikkausmurtokokeesta saatuihin jännitys-venymäkäyriin (RD ja TD). Työssä käytettävän Cockroft-Latham-vauriomallin kriittisen arvon suuruus

määritettiin lopulta vastaamaan mahdollisimman tarkasti digitaalisen kuvantamis-
menetelmän avulla saatuja kokeellisia tuloksia, jolloin materiaalin kriittiseksi arvoksi C
saatiin 400. Kuvassa 42 esitetyssä kuvaajassa on yhdistetty kokeellisesti mitattujen
leikkausmurtokokeiden tulokset sekä simulaatiosta saadut tulokset eri kriittisen arvon
avulla (400, 520, 800). Kuvaajasta nähdään, että kriittisen arvon C ollessa 400,
materiaalin simulaatiokäyttäytyminen vastaa hyvin sen todellista käyttäytymistä.



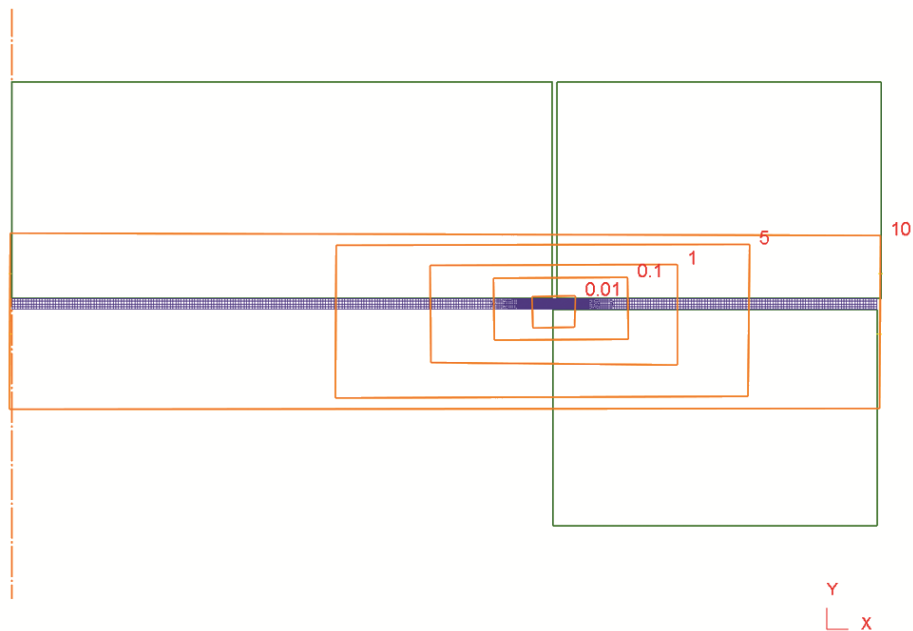
Kuva 41. Materiaalin kriittisen arvon C määrittäminen. Kuvasta nähdään, miten digitaalisen
kuvantamismenetelmän avulla saadut tulokset (yläpuolella) mallinnettiin simulaatiosauvan tuloksiin
(alapuolella).



Kuva 42. Materiaalin kriittisen arvon C määrittäminen. Kuvassa on esitetty leikkausmurtokokeesta saadut
jännitys-venymäkäyrät (RD ja TD) sekä simulaation avulla määritetyn kriittisen arvon C sovittaminen
kokeellisiin tuloksiin. Simulaatitulokset vastaavat kokeellisesti saatuja tuloksia, kun kriittinen arvo C
on 400.

10. Sähkölevyn meistoleikkauksen simulointi

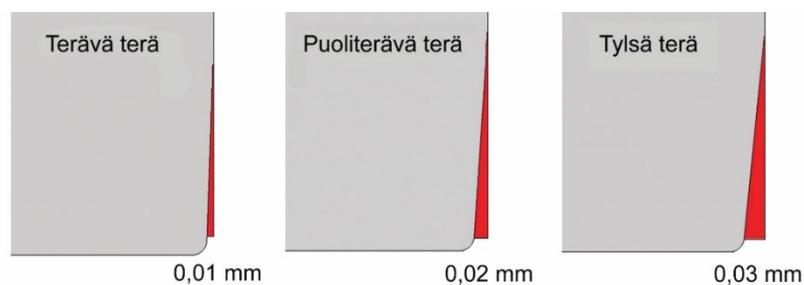
M400-50A sähköteräksen meistoleikkauksen simulointi aloitettiin muodostamalla Deformiin yksinkertaistettu 2D-malli teollisuudessa käytetystä meistoleikkaimesta. Simulaation tarkastelun kohteeksi valittiin staattorihampaan reuna, koska suurimmat jännityksistä aiheutuvat rautahäviöt muodostuvat staattorihampaassa olevista jäännösjännityksistä sekä leikkausreunaan muodostuneesta purseesta. Lisäksi leikkausprosessin tarkastelu säilyi yksinkertaisena, jolloin mahdollisten virheiden syntyminen saatiin minimoitua. Simulaatiossa muodostettu 2D-malli oli myös mahdollista muuntaa 3D-malliksi Deformiin sisäänrakennetun 2D-3D-muuntimen avulla. Simulaatiossa leikattava materiaali, M400-50A, mallinnettiin kimmoplastiseksi materiaaliksi pistimen ja tyynyn ollessa täysin joustamattomia. Kuvassa 43 on esitetty simulaatiossa käytetyn meistoleikkaimen rakenne. Simulaatiossa työkappale asetettiin tyynyn ylä- ja alaosan väliin. Pistimen ja tyynyn väliseksi leikkausväliksi valittiin 0,03 mm. Tyynyn yläosan jousivoimaksi määritettiin 222 N/mm. Simulaation leikkausprosessi tapahtui meistoleikkausteorian mukaisesti.



Kuva 43. Meistoleikkaimen simulaatiomallin rakenne. Simulaatiossa tarkasteltiin staattorihampaan päädyn leikkaamista ja syntyvien jännityksien suuruutta, kun M400-50A-sähköterästä leikattiin terävällä, puoliterävällä ja tylsällä pistimellä.

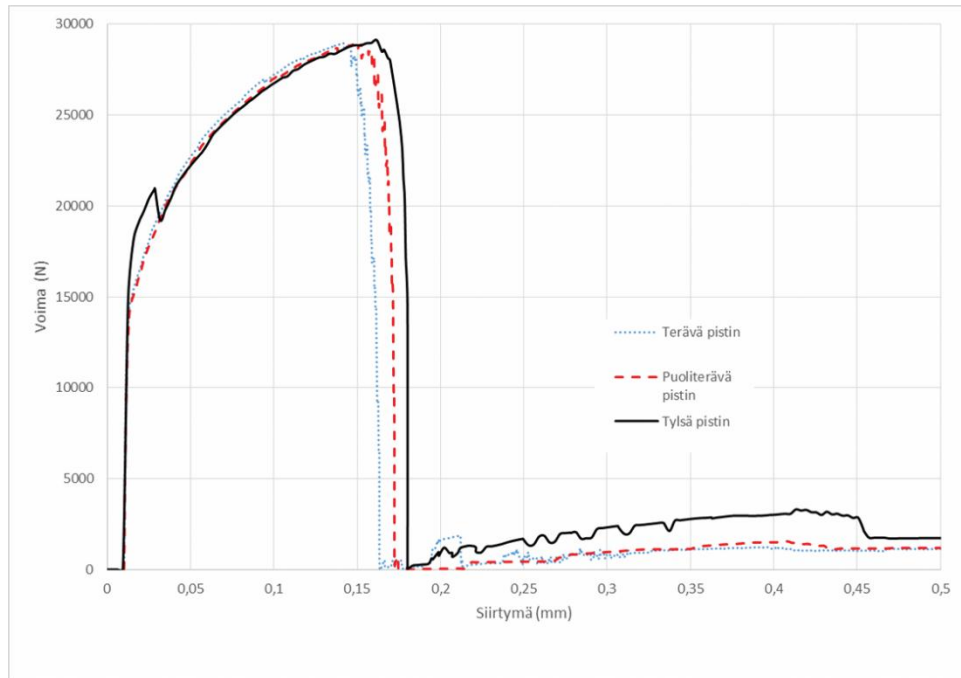
Simulaatiossa työkappale jaettiin tasaisesti 15 000 elementin kesken siten, että lähimpänä leikkausreunaa elementtiverkon koko valittiin tiheimmäksi, mistä lähtien sitä kasvatettiin tasaisin välein suuremmaksi, kuten kuvasta 43 nähdään. Leikkaimen osien ja työkappaleen väliseksi kitkaksi valittiin vakiona oleva Coulombin kitka, jonka arvoksi valittiin 0,3. Aika-askelvaiheita valittiin yhteensä 3000 kappaletta. Simulaatiovaiheiden aikaväli laskettiin käytetyn elementtikoon perusteella, jakamalla elementtikoon puolikas käytetyllä pistimen puristusnopeudella. Simulaatiovaiheiden aikaväliksi saatiin $3,5 \times 10^{-6}$ sekuntia/simulaatiovaihe, joka pidettiin vakiona jokaisessa simulaatiossa. Tässä työssä pistimen puristusnopeutena käytettiin 900 mm/sekunti. Simulaatio suoritettiin myös käyttämällä pienempää pistimen puristusnopeutta, mutta tuloksista havaittiin, että valitulla pistimen nopeudella ei ollut merkitystä syntyviin jännityksiin eikä leikkausreunan muotoon. Meistosimulaatioissa lämpötilan vaikutus jännityksiin oletettiin olevan hyvin pieni, minkä takia mittauksissa ei huomioitu lämpötilaa.

Simulaatiot suoritettiin kolmella eri pistimen leikkausterän terävyydellä (terävä, puoliterävä ja tylsä). Kuvassa 44 on esitetty simulaatiossa käytetyn terävän, puoliterävän ja tylsän pistimen geometriat. Terävän pistimen kulumaksi valittiin 0,01 mm, puoliterävän pistimen kulumaksi 0,02 mm ja tylsän pistimen kulumaksi 0,03 mm. Pistimen leikkaavan särmän suojaviisteinä käytettiin 0,02 mm:ä (pyöristetty alue kuvan 44 alareunassa), mikä on yleinen minimiarvo teräville leikkainterille.



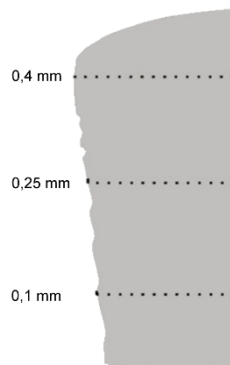
Kuva 44. Simulaatiossa käytettyjen pistimien eri terävyydet. Terävimmässä pistimessä oli 0,01 mm:n kuluma, puoliterävässä 0,02 mm:n kuluma ja tylsän pistimen terässä 0,03 mm:n kuluma.

Kuvassa 45 on esitetty terävän, puoliterävän ja tylsän pistimen puristusvoimat leikkauksen aikana. Puristusvoimat olivat suurimmat, kun levyä leikattiin tylsällä pistimellä ja pienimmät, kun leikkautuminen tapahtui terävällä pistimellä, mikä vastaa hyvin meistotekniikan teoriaa. Saadut tulokset vastaavat myös kuvassa 15 esitettyä leikkaustapahtuman puristusjännityskuvaajaa.



Kuva 45. Kuvassa on esitetty terävän, puoliterävän ja tylsän pistimen aiheuttamat jännitykset.

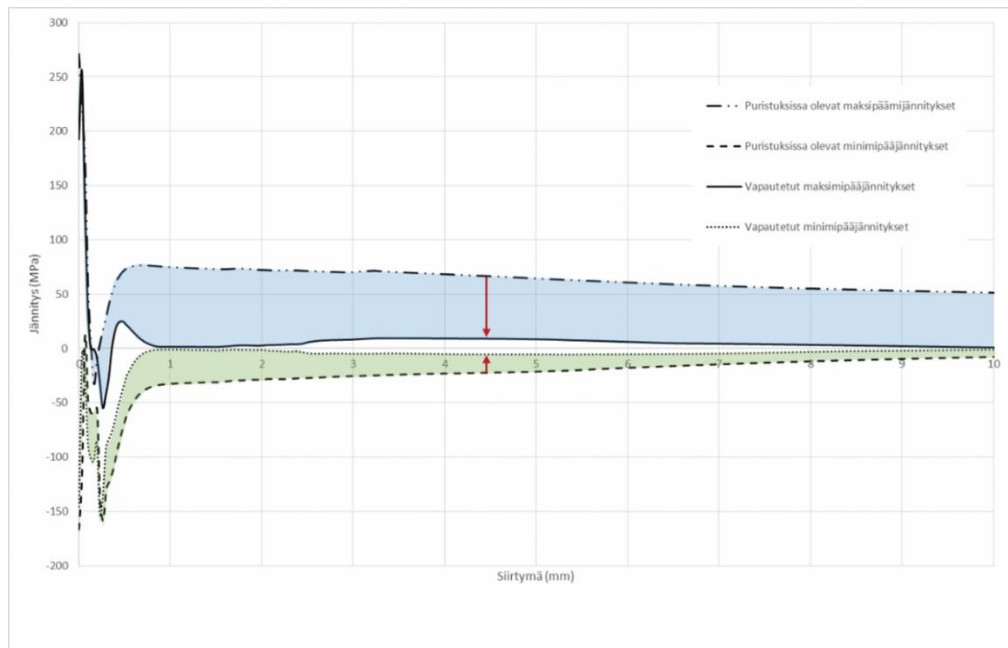
M400-50A-sähköteräksen leikkausreunan jännityksiä tarkasteltiin kolmesta eri kohtaa: 0,1 mm:n päässä sähkölevyn yläreunasta, sähkölevyn puolesta välistä (0,25 mm:n päässä yläreunasta) ja 0,1 mm:n päässä sähkölevyn alareunasta, kuten kuvassa 46 on esitetty. Edellä mainituista kohdista mitattiin sähkölevyn maksimi- ja minimipääjännitykset sekä normaalijännitykset.



Kuva 46. M400-50A-sähköteräslevyn leikkausreunan jännityksiä tarkasteltiin kolmesta eri kohdasta; 0,1 mm:ia sähkölevyn yläreunasta, sähkölevyn puolesta välistä (0,25 mm:ia levyn yläreunasta) sekä 0,1 mm:ia staattorilevyn alareunasta.

Sähkölevyn leikkausreunan jännitykset mitattiin sekä puristuksissa olevasta levystä että vapautetusta levystä. Vapautetut jännitykset saatiin mitattua poistamalla simulaatiosta levyä puristava ylätyyny. Kuvassa 47 on esitetty terävällä pistimellä leikatun sähkölevyn

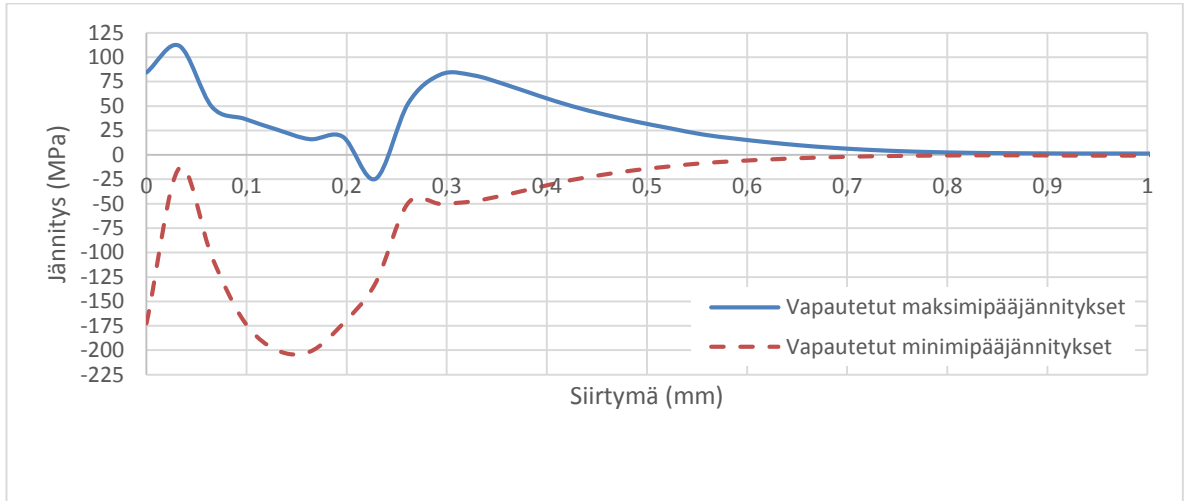
keskikohdan (0,25 mm levyn yläreunasta) maksimi- ja minimipääjännitykset vertaamalla tyynyn puristuksessa olevia jännityksiä vapautettuihin jännityksiin. Sininen alue kuvaa puristuksessa olevien maksimipääjännityksien ja vapautettujen maksimipääjännityksien eroa, vihreä alue kuvaa puristuksessa olevien minimipääjännityksien ja vapautettujen minimipääjännityksien välistä eroa. Kuvasta nähdään, että vapautetut maksimijännitykset ovat noin 50 MPa pienemmät puristuksessa oleviin maksimipääjännityksiin verrattuna. Vapautetut minimipääjännitykset ovat noin 10–20 MPa suuremmat puristuksessa oleviin minimipääjännityksiin verrattuna.



Kuva 47. Kuvassa on vertailtu terävällä pistimellä leikatun sähkölevyn keskikohdan maksimi- ja minimipääjännityksiä, kun sähkölevy on tyynyn puristuksessa ja vapautettuna puristuksesta. Sininen alue kuvaa puristuksessa olevien maksimipääjännityksien ja vapautettujen maksimipääjännityksien eroa, vihreä alue kuvaa puristuksessa olevien minimipääjännityksien ja vapautettujen minimipääjännityksien välistä eroa.

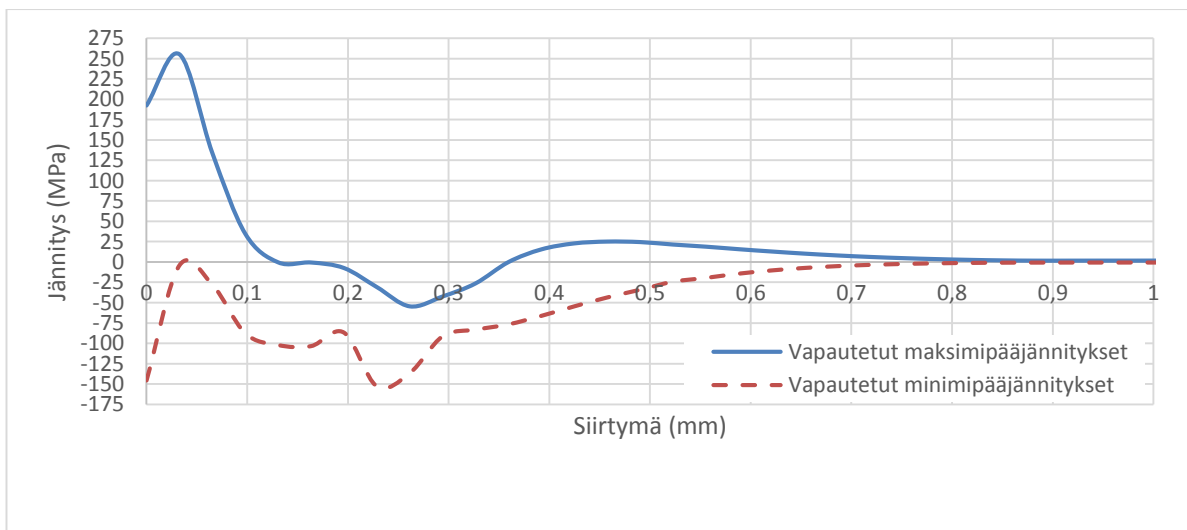
Tämän jälkeen Deform-elementtimallinnusohjelmalla laskettiin vapautetut pää- ja keskijännitykset muodostuneesta leikkausreunasta, 0,1 mm:n päässä levyn yläreunasta, levyn puolesta välistä ja 0,1 mm:n päässä levyn alareunasta, kullekin pistimen eri terävyysasteelle (terävä, puoliterävä ja tylsä).

Kuvasta 48 nähdään terävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset 0,1 mm:n päässä levyn yläreunasta. Yhden millimetrin siirtymän jälkeen maksimipääjännitykset olivat noin 5 MPa ja minimipääjännitykset -10 MPa. 10 mm:n päässä leikkausreunasta molemmat pääjännitykset olivat nolliä.



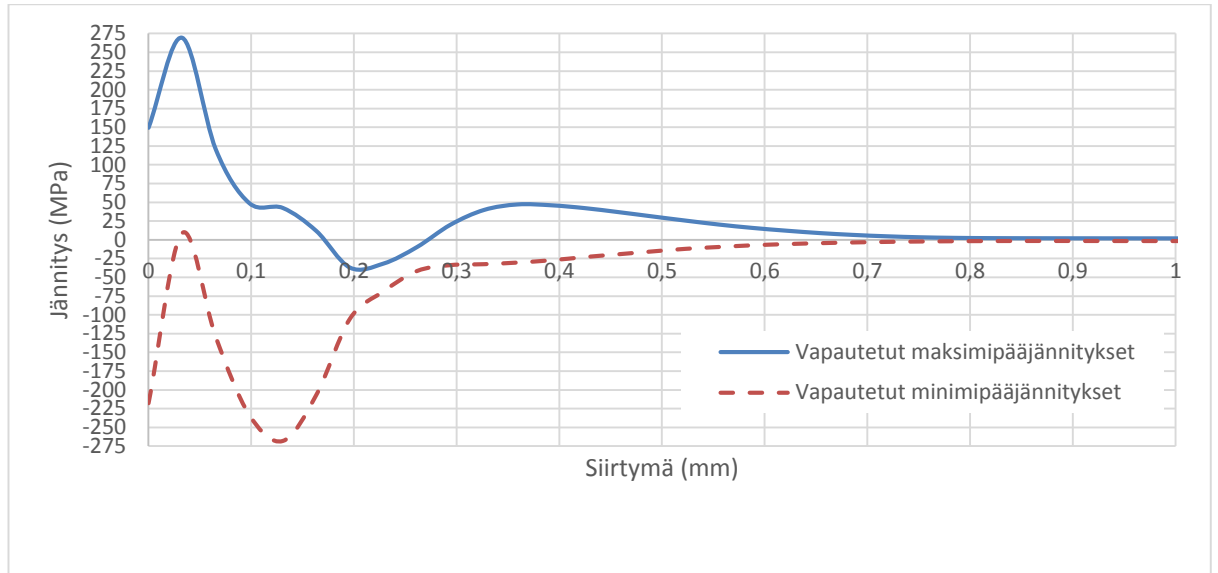
Kuva 48. Terävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset 0,1 mm:n päässä sähkölevyn yläreunasta.

Kuvasta 49 nähdään terävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset levyn keskikohdalta. Yhden millimetrin siirtymän jälkeen maksimipääjännitykset olivat noin 10 MPa ja minimipääjännitykset -5 MPa. Kuitenkin 10 mm:n päässä leikkausreunasta molemmat pääjännitykset olivat nolliä.



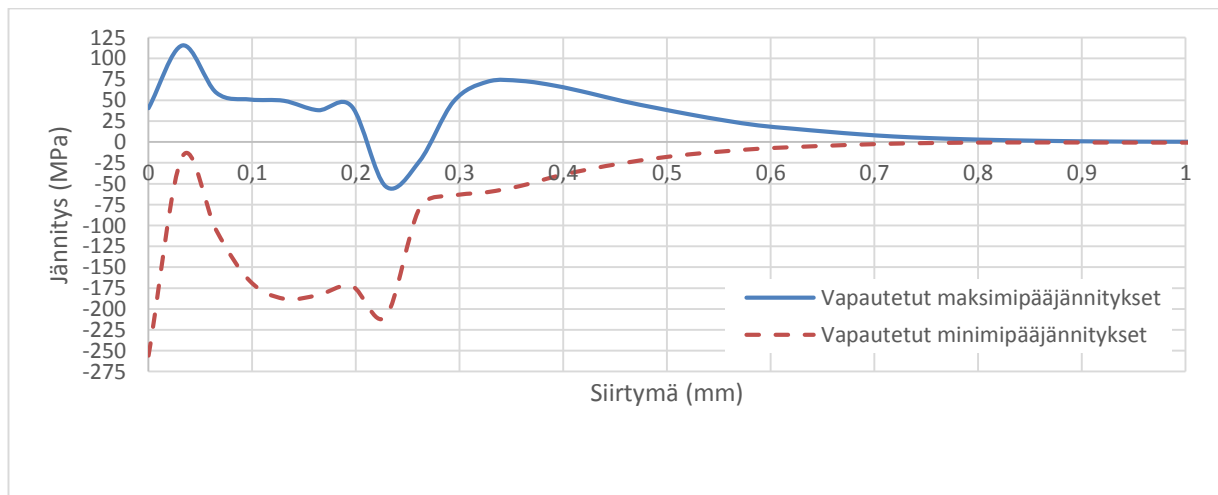
Kuva 49. Terävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset levyn keskikohdalta (0,25 mm levyn yläreunasta).

Kuvasta 50 nähdään terävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset 0,1 mm:n päässä levyn alareunasta. Yhden millin siirtymän jälkeen vapautetut minimipääjännitykset olivat noin -5 MPa ja vapautetut maksimijännitykset noin 10 MPa. Molemmat jännitykset saavuttivat nollan 10 mm:n siirtymän kohdalla.



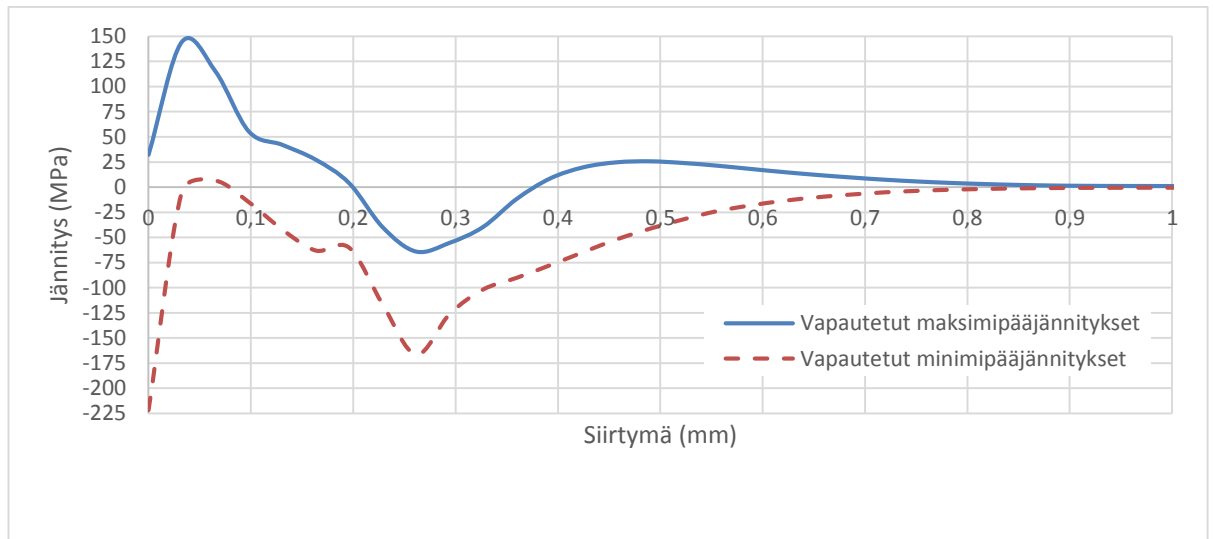
Kuva 50. Terävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset 0,1 mm:n päässä levyn alareunasta.

Kuvasta 51 nähdään puoliterävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset 0,1 mm:n päästä levyn yläreunasta. Molemmat pääjännitykset lähestyivät nollaa 1 mm:n siirtymän jälkeen.



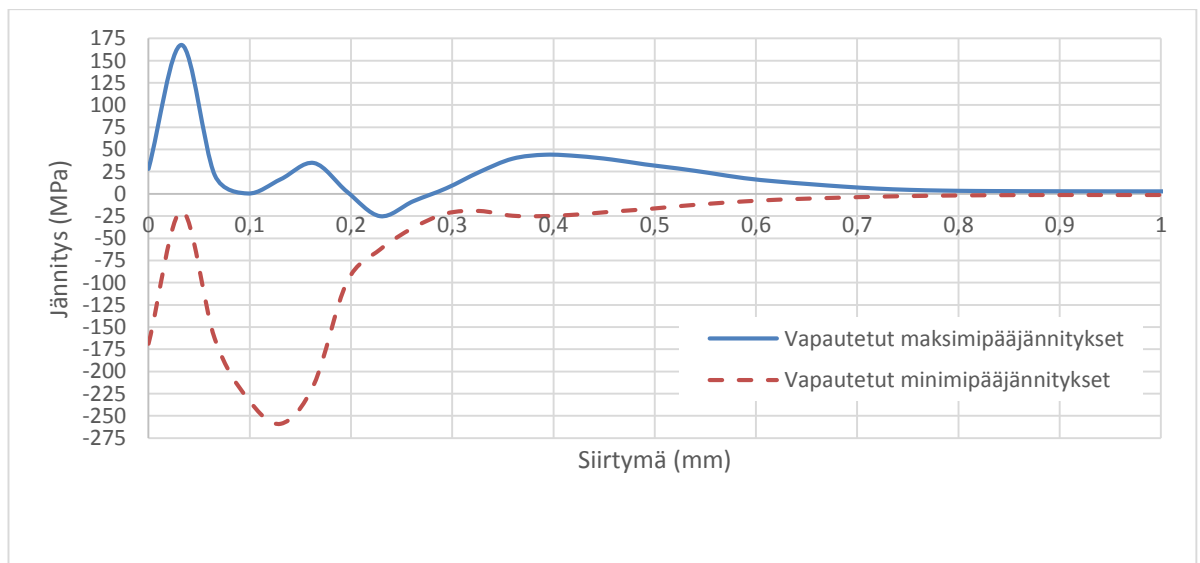
Kuva 51. Puoliterävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset 0,1 mm:n päästä levyn yläreunasta.

Kuvasta 52 nähdään puoliterävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset levyn keskikohdalta. Molemmat pääjännitykset lähestyivät nollaa 1 mm:n siirtymän jälkeen.



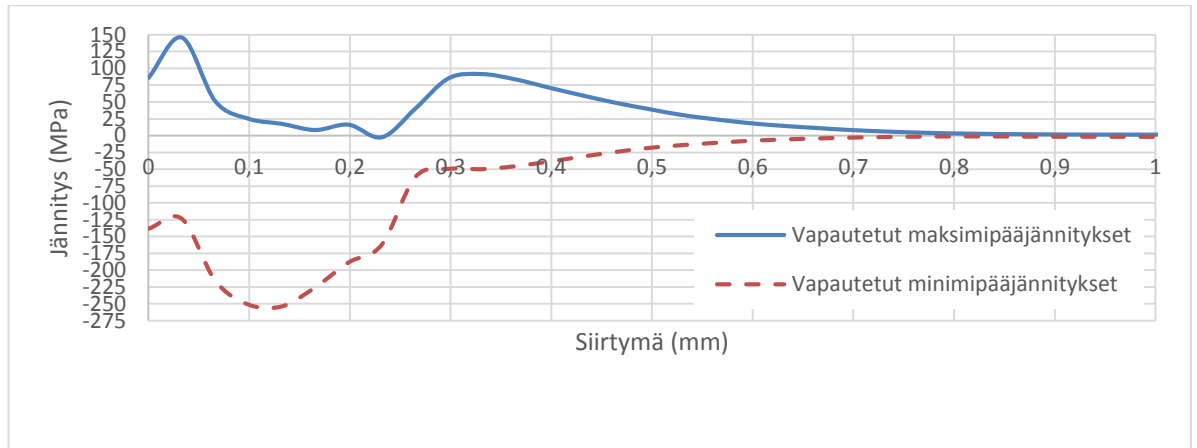
Kuva 52. Puoliterävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset levyn keskikohdalta (0,25 mm:ia levyn yläreunasta).

Kuvasta 53 nähdään puoliterävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset 0,1 mm:n päässä levyn alareunasta. Molemmat jännitykset lähestyivät nollaa 1 mm:n siirtymän jälkeen.



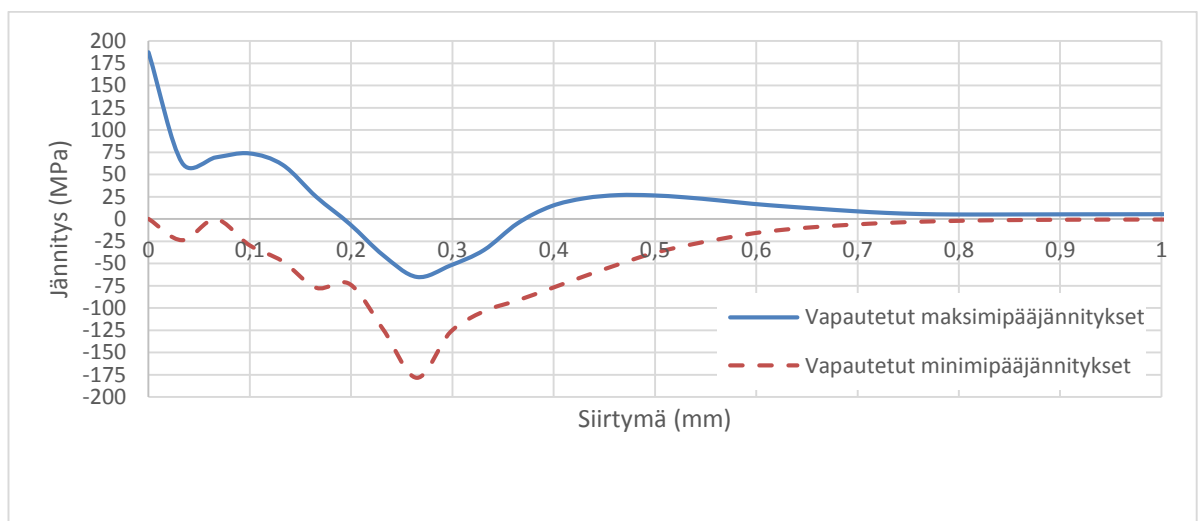
Kuva 53. Puoliterävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset 0,1 mm:n päässä levyn alareunasta.

Kuvasta 54 nähdään tylsällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset 0,1 mm:n päässä levyn yläreunasta. Maksimipääjännitykset olivat noin 10 MPa ja minimipääjännitykset noin -10 MPa 1 mm:n siirtymän jälkeen. 10 mm:n siirtymän kohdalla maksimipääjännitykset olivat 0 MPa ja minimipääjännitykset noin -5 MPa.



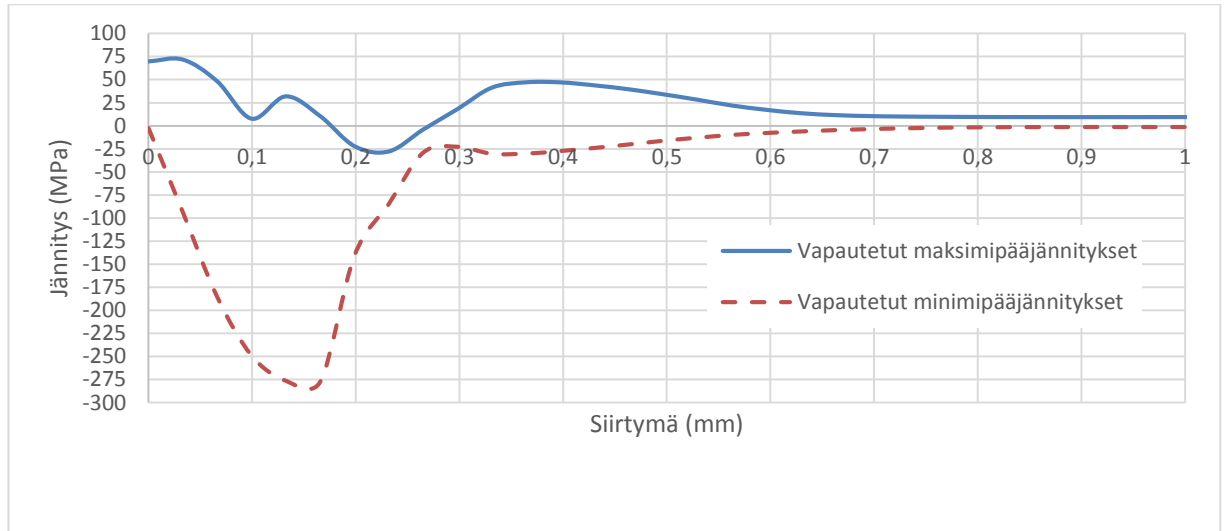
Kuva 54. Tylsällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset 0,1 mm:n päässä levyn yläreunasta.

Kuvasta 55 nähdään tylsällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset levyn keskikohdalta. Maksimipääjännitykset olivat 10–20 MPa ja minimipääjännitykset -10 MPa 1 mm:n siirtymän jälkeen. 10 mm:n siirtymän kohdalla molemmat pääjännitykset olivat likimain nollia.



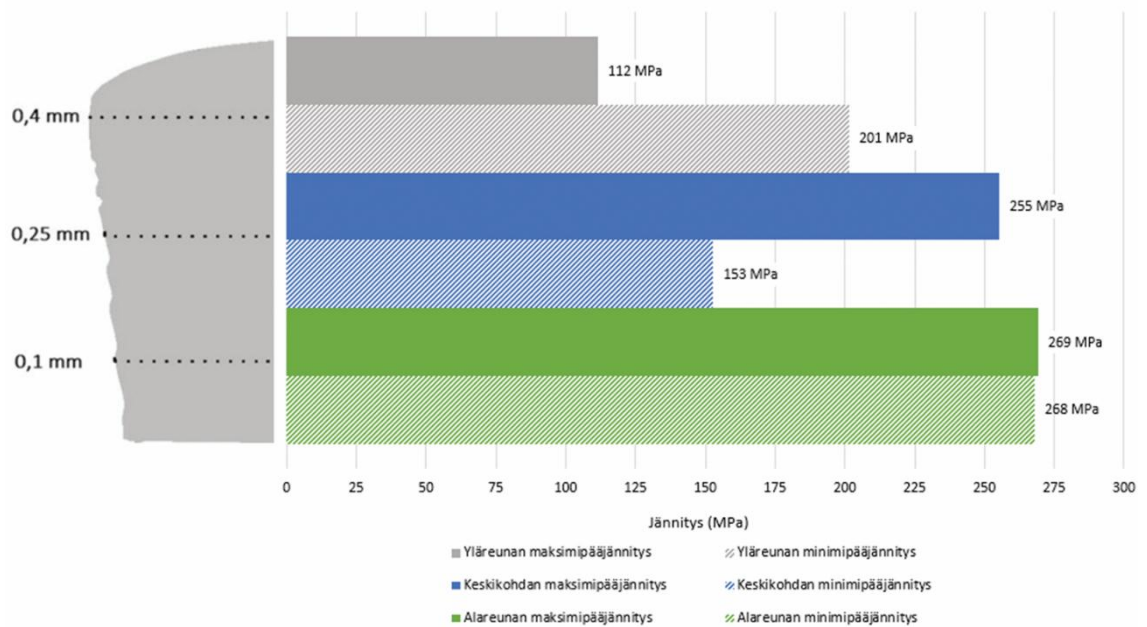
Kuva 55. Kuvassa on esitetty tylsällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset levyn keskikohdalta (0,25 mm levyn yläreunasta).

Kuvasta 56 nähdään tylsällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset 0,1 mm:n päässä levyn alareunasta. Maksimipääjännitykset olivat noin 10–20 MPa ja minimipääjännitykset noin -5 MPa 1 mm:n siirtymän jälkeen. 10 mm:n kohdalla molemmat pääjännitykset olivat likimain 0 MPa.



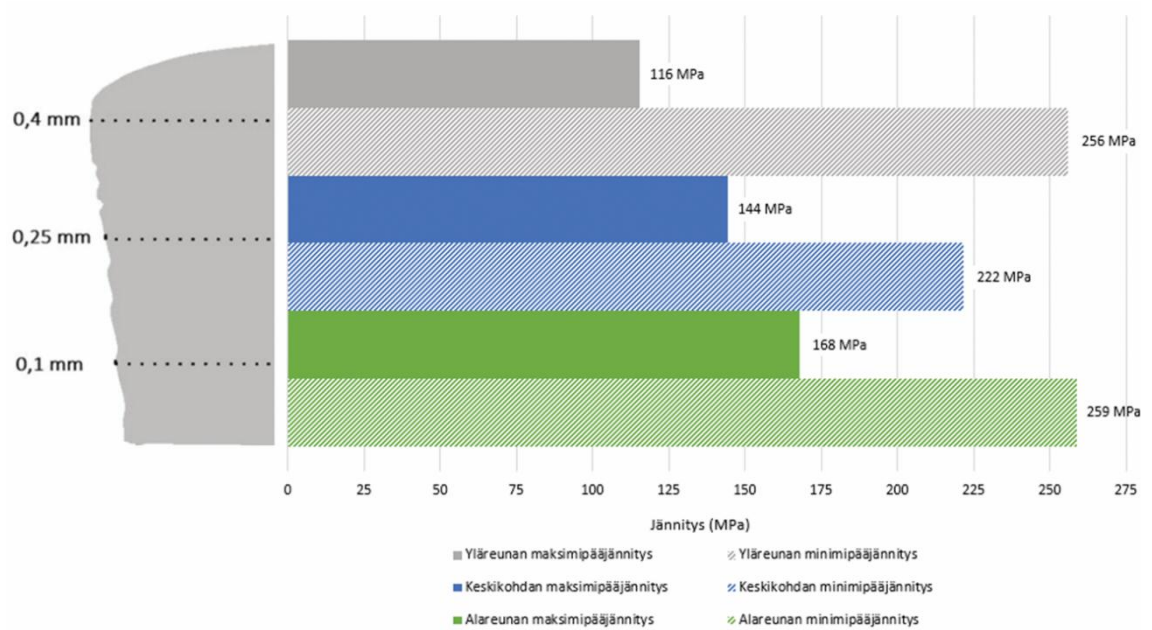
Kuva 56. Kuvassa on esitetty tylsällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset 0,1 mm:n päässä levyn alareunasta.

Kuvassa 57 on esitetty pylväsdiagrammi terävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetuista maksimi- ja minimipääjännityksistä. Kuvasta nähdään, että terävällä pistimellä leikattaessa suurimmat maksimipääjännitykset muodostuivat 0,1 mm:n päähän sähkölevyn leikkausreunan alareunasta. Pienimmät minimipääjännitykset muodostuivat myöskin 0,1 mm:n päähän sähkölevyn alareunasta. Pienimmät maksimipääjännitykset muodostuivat 0,1 mm:n päähän sähkölevyn yläreunasta ja suurimmat minimipääjännitykset sähkölevyn leikkausreunan keskikohtaan. Kuvissa 13, 14 ja 15 negatiiviset minimipääjännitykset on esitetty itseisarvoina, jotta niiden vertaaminen maksimipääjännityksiin on helpompaa.



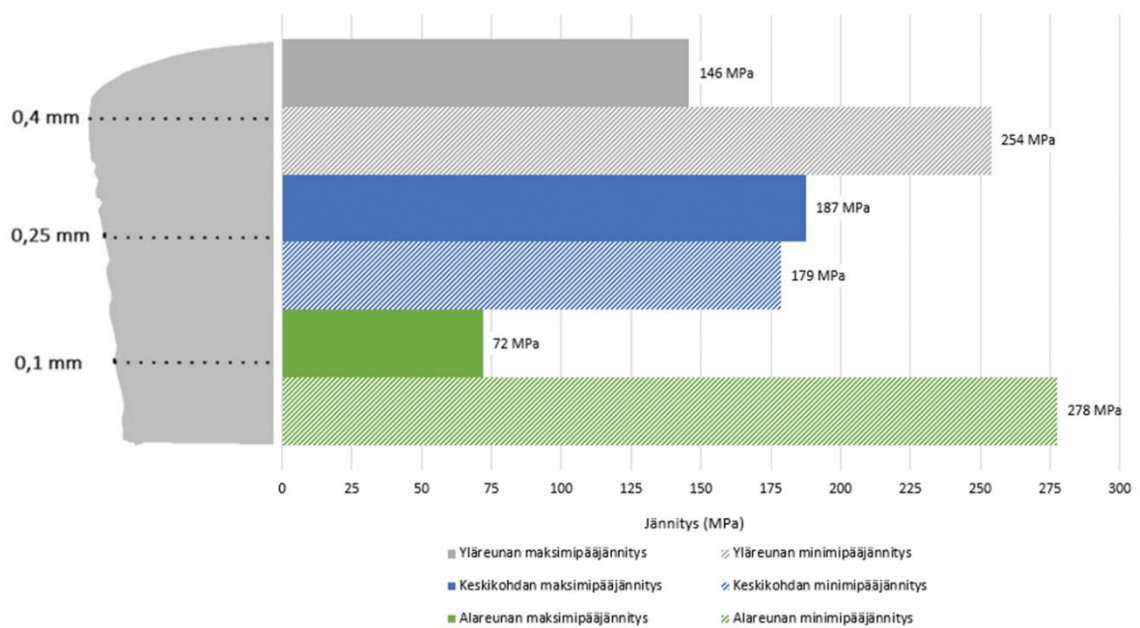
Kuva 57. Pylväsdiagrammi terävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetuista maksimi- ja minimipääjännityksistä.

Kuvassa 58 on esitetty pylväsdiagrammi puoliterävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetuista maksimi- ja minimipääjännityksistä. Kuvasta nähdään, että puoliterävällä pistimellä leikattaessa suurimmat maksimipääjännitykset muodostuivat leikkausreunan alareunaan. Pienimmät minimipääjännitykset muodostuivat leikkausreunan ala- ja yläreunaan. Pienimmät maksimijännitykset syntyivät leikkausreunan yläreunaan ja suurimmat minimijännitykset leikkausreunan keskikohtaan.



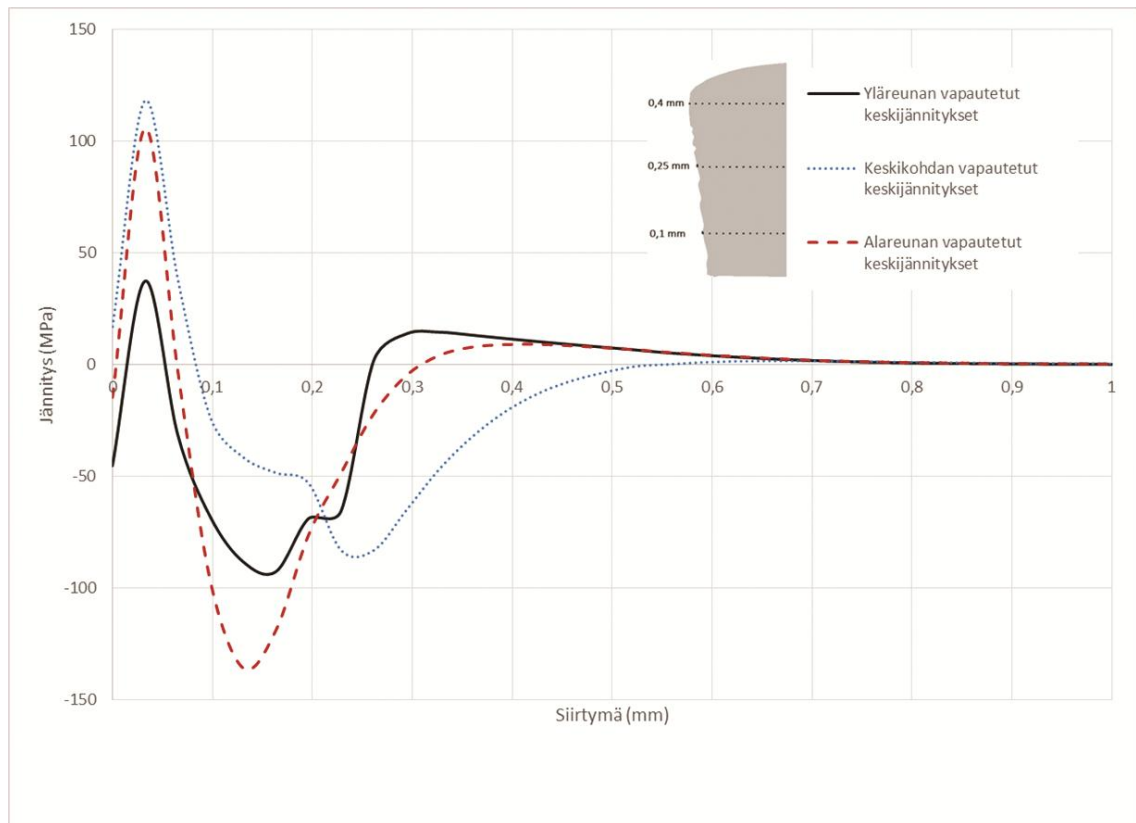
Kuva 58. Pylväsdiagrammi puoliterävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetuista maksimi- ja minimipääjännityksistä.

Kuvassa 59 on esitetty pylväsdiagrammi tylsällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetuista maksimi- ja minimipääjännityksistä. Kuvasta nähdään, että suurimmat maksimipääjännitykset muodostuvat leikkausreunan keskikohtaan ja pienimmät minimipääjännitykset leikkausreunan alareunaan, kun sähkölevy leikattiin tylsällä pistimellä. Kuvasta nähdään, että leikkausreunan yläreunaan muodostuu lähes yhtäsuuret minimipääjännitykset kuin leikkausreunan alareunaan. Selkeästi pienimmät maksimipääjännitykset muodostuivat leikkausreunan alareunaan. Suurimmat minimipääjännitykset muodostuivat leikkausreunan keskikohtaan.



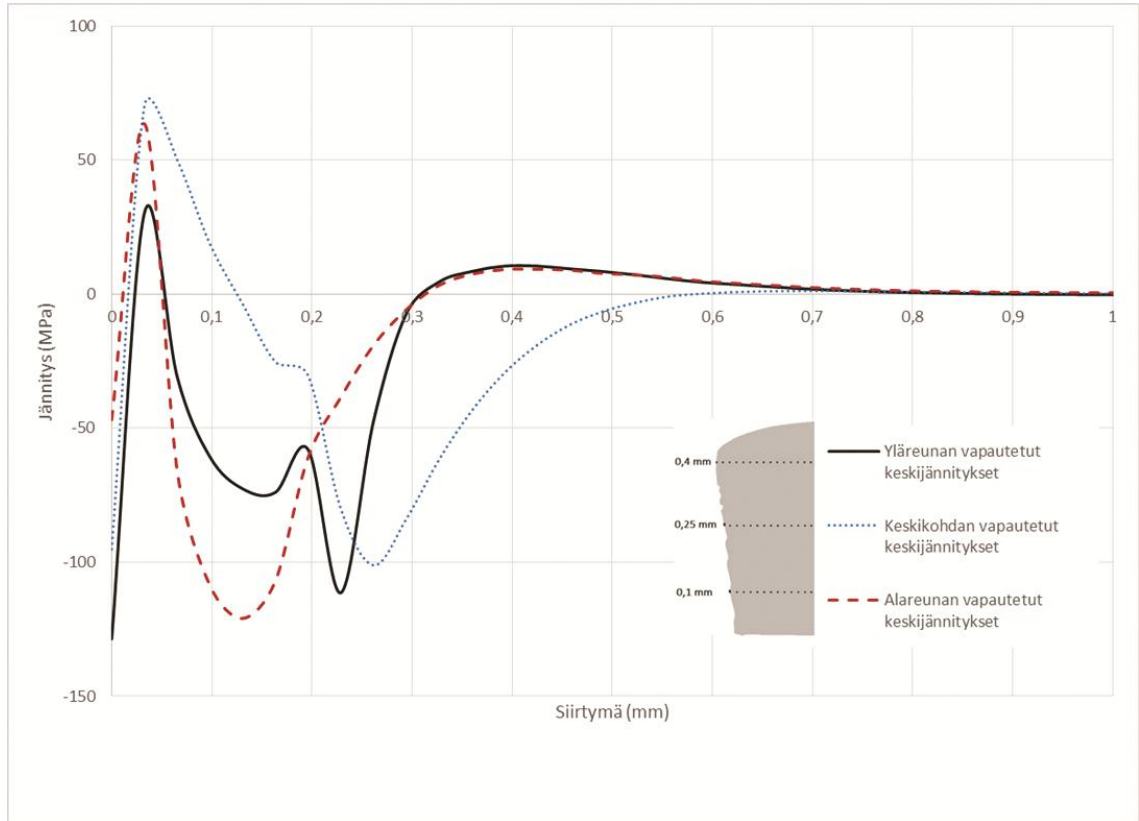
Kuva 59. Pylväsdiagrammi tylsällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetuista maksimi- ja minimipääjännityksistä.

Kuvassa 60 on esitetty terävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautetut keskijännitykset sähkölevyn leikkausreunan eri kohdissa. Kuvasta nähdään, että suurimmat keskijännitykset muodostuivat sähkölevyn keskikohtaan ja pienimmät jännitykset taas sähkölevyn alareunaan. Keskijännitykset lähestyivät nollaa 1 mm:n siirtymän jälkeen jokaisessa eri kohdassa.



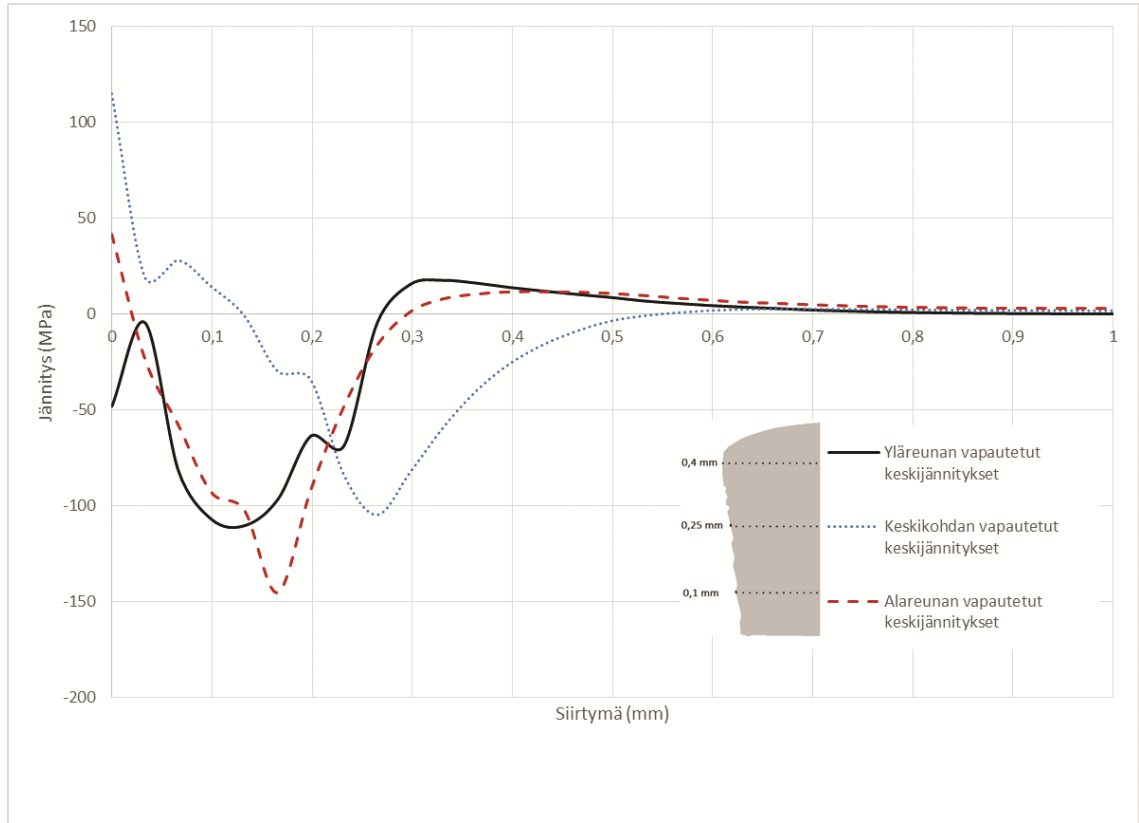
Kuva 60. Terävällä pistimellä leikatut vapautetut keskijännitykset sähkölevyn leikkausreunan eri kohdissa.

Kuvassa 61 on esitetty puoliterävällä pistimellä leikatut vapautetut keskijännitykset sähkölevyn leikkausreunan eri kohdissa. Suurimmat keskijännitykset muodostuivat sähkölevyn keskikohtaan ja pienimmät jännitykset sähkölevyn yläreunaan. Keskijännitykset lähestyivät nollaa 1 mm:n siirtymän jälkeen jokaisessa eri kohdassa.



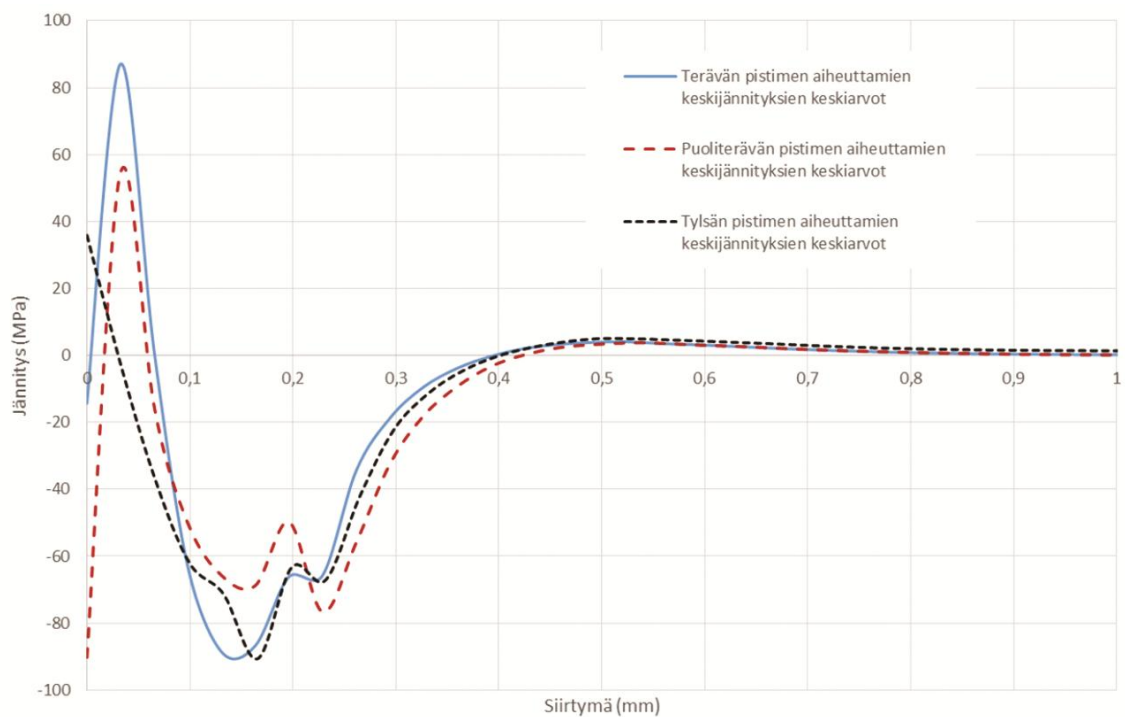
Kuva 61. Puoliterävällä pistimellä leikatut vapautetut keskijännitykset leikkausreunan eri kohdissa.

Kuvassa 62 on esitetty tylsällä pistimellä leikatut vapautetut keskijännitykset sähkölevyn leikkausreunan eri kohdissa. Suurimmat jännitykset muodostuivat leikkausreunan keskikohtaan ja pienimmät jännitykset leikkausreunan alareunaan. Keskijännitykset lähestyivät nollaa 1 mm:n siirtymän jälkeen jokaisessa eri kohdassa.



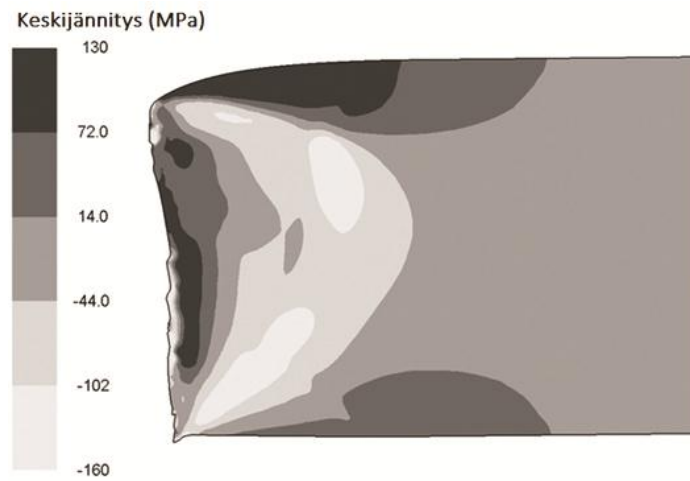
Kuva 62. Tylsällä pistimellä leikatut vapautetut keskijännitykset leikkausreunan eri kohdissa.

Kuvassa 63 on esitetty terävän, puoliterävän ja tylsän pistimen aiheuttamien keskijännityksien lasketut keskiarvot leikkausreunan kolmesta eri kohdasta (yläreuna, keskikohta ja alareuna). Kuvasta nähdään, että levyn leikkausreunaan muodostuu aluksi noin 55–85 MPa:n vetojännitys 0,04 mm:n päähän levyn leikkausreunasta. Vetojännitys muuttuu 0,08 mm:n siirtymän jälkeen puristusjännitykseksi. Sähkölevy on jännityksetön noin 0,8 mm:n päässä leikkausreunasta. Suurin vetojännitys muodostuu terävällä pistimellä leikattaessa ja suurin puristusjännitys taas tylsällä pistimellä leikattaessa. Kuten kappaleessa 7.1 todettiin, monikiteisen raudan magnetostriktio on positiivinen, jolloin sähkölevyyn kohdistuva vetojännitys kasvattaa sen permeabiliteettia ja vastaavasti levyyn kohdistuva puristusjännitys pienentää sitä. Tästä johtuen ainoastaan puristusjännityksellä on vaikutusta muodostuvien rautahäviöiden suuruuteen. Kuvasta 13 nähdään, että sähkölevyn puristusjännitykset ovat suuruudeltaan noin 50–90 MPa, eikä eri pistimien terävyydellä ole suurta vaikutusta jännityskuvaajan muotoon. Näin ollen voidaan todeta, että simulaatiossa käytettyjen pistinten kulumisasteilla ei ole merkittävää vaikutusta sähkölevyyn jäävien puristusjännitysten kannalta.



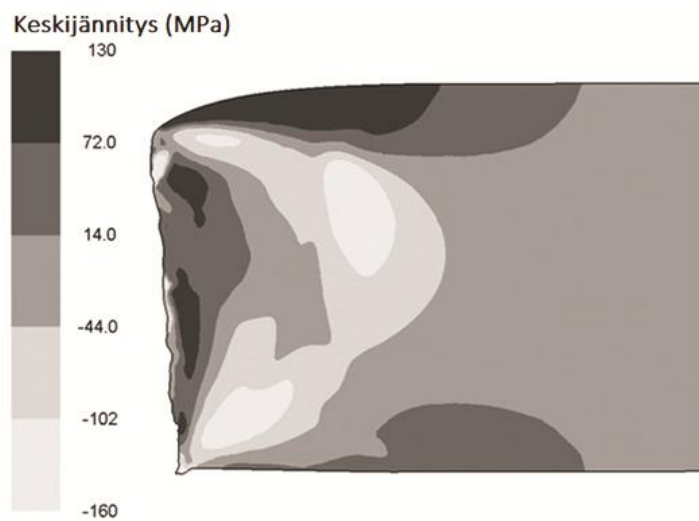
Kuva 63. Kuvassa on esitetty terävän, puoliterävän ja tylsän pistimen aiheuttamien keskijännitysten lasketut keskiarvot leikkausreunan kolmesta kohdasta (yläreuna, keskikohta ja alareuna).

Kuvassa 64 on esitetty terävällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautettujen keskijännitysten jakautuminen levyn leikkausreunassa.



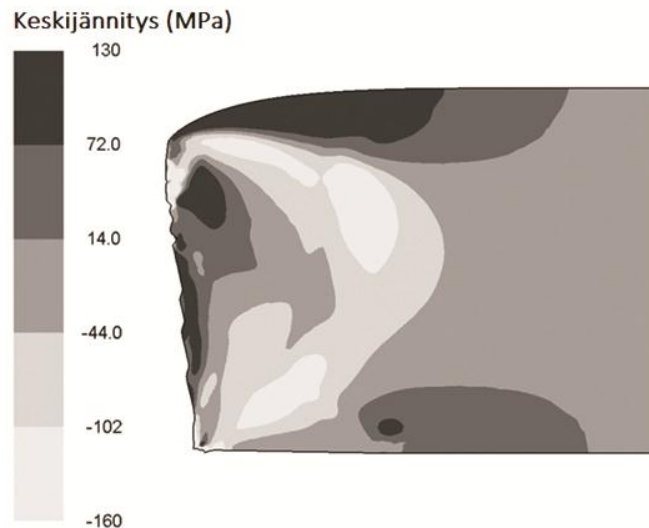
Kuva 64. Keskijännityksien jakautuminen terävän pistimen leikkausreunassa.

Kuvassa 65 on esitetty puoliterävän pistimen leikatun sähkölevyn vapautettujen keskijännityksien jakautuminen leikkausreunassa.



Kuva 65. Keskijännityksien jakautuminen puoliterävän pistimen leikkausreunassa.

Kuvassa 66 on esitetty tylsällä pistimellä leikatun sähkölevyn vapautettujen keskijännityksien jakautuminen leikkausreunassa.



Kuva 66. Keskijännityksien jakautuminen tylsän pistimen leikkausreunassa.

Kuvista 64, 65 ja 66 nähdään, että leikkausreunoissa on havaittavissa pientä leikkauspursetta. Terävällä pistimellä leikattaessa purseen korkeudeksi mitattiin ohjelman mittatyökalulla $9\text{ }\mu\text{m}$, puoliterävällä pistimellä leikattaessa purseen korkeudeksi mitattiin $7\text{ }\mu\text{m}$ ja tylsällä pistimellä leikattaessa purseen korkeudeksi mitattiin $3\text{ }\mu\text{m}$. Čada et al. [72] mukaan leikkauksessa muodostuneen purseen korkeus ei saa olla suurempi kuin 10 %:ia levynpaksuudesta, jolloin M400-50A-sähköteräksen kohdalla purseen maksimikorkeus on $50\text{ }\mu\text{m}$. Klimczy et al. [73] mukaan terävällä leikkaimella leikkausreunaan muodostuu alle $10\text{ }\mu\text{m}$ korkuinen purse. Meistoleikkausteorian mukaan pienin purse muodostuu terävällä pistimellä leikattaessa ja suurin tylsällä pistimellä leikattaessa. Saadut simulaatiotulokset eivät täysin vastaa meistoleikkausteoriaa, mikä todennäköisimmin johtui elementtimallinnusohjelman toimintatavasta poistaa elementtejä laskennan aikana. Luultavasti ohjelmisto on poistanut elementtejä muodostuneen purseen kohdalta kappaleen irtileikkausvaiheessa, jolloin tylsällä pistimellä leikatun levyn purse on jäänyt jätekappaleen reunaan. Muodostuneiden purseiden korkeudet ovat kuitenkin pieniä, jolloin niillä ei ole suurta vaikutusta leikkausreunan laatuun. Tämän lisäksi leikkausterän $0,02\text{ mm}$:n suojavaisteella saattoi olla vaikutusta muodostuvan purseen korkeuteen.

11. Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää elementtimallintamisen avulla M400-50A-sähkölevyn leikkausprosessista aiheutuvien jännitysten suuruus materiaalin leikkausreunan läheisyydessä, kun levyä leikattiin terävällä, puoliterävällä ja tylsällä pistimellä. Tutkimuksessa käytettävä materiaalmalli määritettiin kokeellisesti M400-50A-sähköteräksestä Deform-elementtimallinusohjelmistoa varten. Materiaalin myötölujittuminen mallinnettiin Hollomonin-yhtälöllä ja materiaalin vaurioituminen Cockroft-Lathamien-vauriomallilla. Hollomonin-yhtälön parametrit, sekä materiaalin tavalliset mekaaniset ominaisuudet määritettiin SFS-EN ISO 6892-1 standardin mukaisella yksiaksisiaalisella vetokokeella. Materiaalin mekaanisia ominaisuuksia verrattiin kolmen eri valmistajan antamiin arvoihin. Cockroft-Lathamien parametrit määritettiin erillisen leikkausmurtokokeen avulla.

Kokeellisesti määritettyyn materiaalmalliin perustuvaa M400-50A-sähköterästä leikattiin meistosimulaation avulla terävällä, puoliterävällä ja tylsällä pistimellä. Simulaatioissa ei huomioitu lämpötilan vaikutusta, sillä sen oletettiin olevan leikkausprosessin kannalta hyvin pieni. Eri pistinten puristusvoimat noudattivat hyvin meistoteoriaa, sillä terävimmällä pistimellä aiheutuivat pienimmät puristusvoimat ja tylsällä taas suurimmat. Leikkausreunan jännitykset mitattiin leikkausreunan kolmesta kohdasta: 0,1 mm:n päässä levyn yläreunasta, levyn keskikohdalta ja 0,1 mm:n päässä levyn alareunasta. Leikkausreunan jännitykset mitattiin sekä tyynyä vasten puristuksissa ollesta sähkölevystä, että vapautetusta levystä. Tuloksena oli, että tyynyä vasten puristuksesta vapautetun sähkölevyn maksimipääjännitykset olivat noin 50 MPa:ia pienemmät puristuksissa olevaan levyyn verrattuna. Vapautetut minimipääjännitykset olivat taas noin 10–20 MPa suuremmat puristuksissa oleviin minimipääjännityksiin verrattuna.

Simulaatiossa laskettiin leikkausreunan vapautetut maksimi- ja minimipääjännitykset kullekin pistimen terävyydelle. Tuloksista nähtiin, että suurimmat vapautetut maksimipääjännitykset syntyivät terävälle pistimelle leikkausreunan alareunaan ja pienimmät minimipääjännitykset leikkausreunan alareunaan. Puoliterävällä pistimellä leikattaessa suurimmat maksimipääjännitykset muodostuivat leikkausreunan alareunaan

ja pienimmät minimipääjännitykset leikkausreunan alareunaan. Tylsällä pistimellä leikattaessa suurimmat pääjännitykset muodostuivat leikkausreunan keskikohtaan ja pienimmät minimipääjännitykset leikkausreunan alareunaan. Tulokset vastaavat hyvin meisteoriaa, sillä leikkausreunan keskikohdassa ja alareunassa leikkausreunaan kohdistuivat suurimmat jännitykset.

Simulaatiolla mitattiin myös muodostuneiden keskijännityksien suuruudet. Tuloksien keskiarvoista nähtiin, että leikkausreunaan kohdistuu aluksi pienelle alueelle noin 50–85 MPa:n vetojännitys. Vetojännitys vaihtuu noin 50–90 MPa:n puristusjännitykseksi 0,08 mm:n siirtymän jälkeen. Kuten kappaleessa 7.1 todettiin, sähköteräkseen kohdistuva vetojännitys parantaa monikiteisen raudan permeabiliteettia, joten sillä ei ole suurta vaikutusta rautahäviöiden määrään. Puristusjännitys taas heikentää monikiteisen raudan permeabiliteettia, minkä vuoksi sillä on merkittävämpi vaikutus muodostuvien rautahäviöiden suuruuteen. Simulaatiotuloksista havaittiin, että pistimen simuloidulla kulumisella ei näytä olevan merkittävää vaikutusta sähkölevyyden jäävien puristusjännityksien suuruuteen.

12. Ehdotukset jatkotutkimukselle

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää elementtimenetelmän avulla M400-50A-sähköteräksen meistoleikkauksesta aiheutuvien jännitysten suuruus materiaalin leikkausreunassa pistimen eri terävyyksillä. Tulevissa tutkimuksissa voisi varmistaa simulaatiosta saatuja tuloksia erikseen suoritettavien meistokokeiden avulla, ja määrittää kokeellisesti meistoleikkaimen ja leikattavan materiaalin välinen kitkamalli. Tämän lisäksi sähkölevyn muodonmuutosnopeuden voisi määrittää kokeellisesti leikkausprosessin aikana, jolloin pistimen nopeuden vaikutusta leikkaimen kulumiselle, ja jännitysten suuruudella, olisi mahdollista tarkastella. Jatkotutkimuksissa olisi myös mielenkiintoista selvittää, millainen vaikutus sähkölevyn paksuudella on leikkausreunaan jäävien jännitysten kannalta, jolloin paksummalle sähköteräslaadulle tulisi laatia erikseen oma materiaalmalli. Tämän työn tulosten pohjalta voidaan tarkastella M400-50A-sähköteräksen leikkausreunan jännityksistä aiheutuvien rautahäviöiden vaikutus sähkömoottorin magneettikenttään, esimerkiksi sähkötekniikkaan soveltuvalla elementtimallinnusohjelmistolla.

Lähdeluettelo

1. ABB Suomessa, Kohti kestäväää maailmaa 2016. Saatavilla:
https://library.e.abb.com/public/9c67ac5d8a07498eb249c8cd3d5d9bfc/ABB_esite_2016.pdf.
[Viitattu 4.4.2016]
2. Euroopan komissio, ilmastotoimet. Saatavilla: <http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies>.
[Viitattu 4.4.2016]
3. ABB, Technical note IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors. Saatavilla:
https://library.e.abb.com/public/1018a82e36b29462c1257d41002b3470/TM025%20EN%2008-2014%20IEC60034-30-1_lowres.pdf, 2014. [Viitattu 4.4.2016]
4. Siemens, Oletko valmis IE3-standardia varten?. Saatavilla:
http://www.siemens.fi/fi/industry/teollisuuden_tuotteet_ja_ratkaisut/tuotesivut/kayttotekniikka_ja_liikkeenohjaus/moottorit_ja_generaattorit/oikosulkumoottorit/pienjannitemoottorit/oletko_valmis_ie3-standardia_varten.htm#toc-3. [Viitattu: 4.4.2016]
5. Vuorivirta, A. ABB Oy, Uudet sähkömoottoritekniikat energiasäästöjen tuojana. Saatavilla:
http://ssty.fi/download/hki2014/014_Antti_Vuorivirta_ABB.ppt.pdf. [Viitattu: 4.4.2016]
6. Callister, W.D. & Rethwisch, D.G. Fundamentals of Materials Science and Engineering. 3.painos. John Wiley & Sons INC, 2008. 882 s. ISBN 978-0-470-23463-1.
7. Cullity, B.D. & Graham, C.D. Introduction to Magnetic Materials. 2.painos. John Wiley & Sons INC, 2009. 544 s. ISBN 978-0-471-47741-9.
8. Beckley, P. Electrical Steels for Rotating Machines. The Institute of Electrical Engineers, 2002. 315 s. ISBN 0-85296-980-5.
9. Krings, A. Iron Losses in Electrical Machines - Influence of Material Properties, Manufacturing Processes and Inverter Operation. KTH School of Electrical Engineering, Stockholm Sweden, väitöskirja, 2014. 167 s. ISBN: 978-91-7595-099-0.
10. Lindroos, V., Sulonen, M. & Veistinen, M. Uudistettu Miekk-Ojan Metallioppi. Teknillisten tieteiden akatemia, Otava, 1986. 841 s. ISBN 951-666-216-1.
11. Hertzberg, R.W. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. 4.painos. John Wiley & Sons INC, 1996. 786 s. ISBN 0-471-01214-9.
12. University of Alberta, Faculty of Science, Earth and Atmospheric Sciences. Kurssin EAS 421 luentosivut, Syksy 2015. Saatavilla:
<https://courses.eas.ualberta.ca/eas421/lecturepages/microstructures.html>. [Viitattu: 1.3.2016]
13. Budinski K.G., & Budinski M.K. Engineering Materials Properties and Selection. 8.painos. Pearson Prentice Hall, 2005. 855 s. ISBN 0-13-132791-7.
14. Outinen, H., Salmi, T. & Vulli, P. Lujuusopin perusteet. Pressus Oy 2007. 464 s. ISBN 978-952-9835-65-2.
15. Ikonen, K. & Kantola, K. Murtumismekaniikka. 2.uudistettu painos. Otatieto Oy, 1986. 413 s. ISBN 951-672-119-2.
16. Hibbeler, R.C. Mechanics of Materials. 8.painos. Pearson Prentice Hall, 2011. 862 s. ISBN 13:978-0-13-602230-5.
17. SFS-EN ISO 6892-1 - Metallien vetokoe osa1: Vetokoe huoneenlämmössä, standardi. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Standardi vahvistettu 2009.
18. Santaola, K. Rasitusopin käsikirja lujuusopin lukijoille. 1.painos. Picaset Oy, 2011. 446 s. ISBN 978-952-67189-3-4.
19. Korhonen A.S. & Larkiola, J. Ohutlevyjen muovauksen perusteet. Uniprint Oulu, 2012. 203 s. ISBN 978-951-42-9786-1.
20. Byskov, E. Elementary Continuum Mechanics for Everyone with Applications to Structural Mechanics. Springer, 2013. 593 s. ISBN 978-94-007-5766-0. DOI 10.1007/978-94-007-5766-0.

21. Asthana, R., Kumar, A. & Dahotre, N. Materials Science in Manufacturing. Elsevier INC, 2006. 628 s. ISBN 13:978-0-7506-7716-5.
22. Björklund, O. Modelling of Failure. Linköping University Institute of Technology, Department of Management and Engineering, diplomityö, 2008. 47 s. ISRN: LIU-IEI-TEK-A--08/00381--SE
23. Johnson, G. & Cook, W. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures. Engineering Fracture Mechanics, 1985. Vol.21, No.1. 31-48 s. doi 0013-7944/85.
24. Özel, T. & Karpat, Y. Identification of Constitutive Material Model Parameters for High-Strain Rate Metal Cutting Conditions Using Evolutionary Computational Algorithms. Materials and Manufacturing Processes, 2007. Vol 22. 659-667 s. DOI:10.1080/10426910701323631
25. Umbrello, D., M'Saoubi, R. & Outeiro, J.C. The Influence of Johnson-Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007. Vol. 47. 462-470 s. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2006.06.006.
26. Pantalé, O., Bacario, J-L., Dalvernny, O., Rakotomalala, R. & Caperaa, S. 2D and 3D numerical models of metal cutting with damage effects. Computer Methods Applied Mechanics and Engineering, 2004. Vol. 193. 4383-4399 s. DOI:10.1016/j.cma.2003.12.062.
27. Laakso, S.V.A. Lastuavan työstön elementtimallintaminen, sovellukset ja käyttö. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, koneenrakennustekniikan laitos. Espoo. 2009. 130 s.
28. Tarigopula, V., Hopperstad, O.S., Langseth, M., Clausen, A.H., Hild, F., Lademo, O.G. & Eriksson, M. A Study of large Plastic Deformations in Dual Phase Steel Using Digital Image Correlation and FE Analysis. Experimental Mechanics, 2008. Vol. 48. 181-196 s. DOI: 10.1007/s11340-007-9066-4.
29. Totten, G., Howes, M. & Inoue, T. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International, 2002. 11-26 s. ISBN: 978-0-87170-729-1. 499 s.
30. Withers, P.J. & Bhadeshia H.K.D.H. Residual Stress. Part 1 - Measurement techniques. Materials Science and Technology. Materials Science and Technology, 2001. Vol 17. 355-365 s. DOI: 10.1179/026708301101509980.
31. Withers, P.J. & Bhadeshia H.K.D.H. Residual Stress. Part 2 - Nature and Origins. Materials Science and Technology, 2001. Vol 17. 366-375 s. DOI: 10.1179/026708301101510087
32. Prime, M.B & DeWald, A.T. The Countour Method. Practical Residual Stress Measurement Methods, 2013. 109-138 s. DOI: 10.1002/9781118402832.ch5.
33. Yelbay, H.I., Cam, I. & Gür, H. Non-destructive determination of residual stress state in steel weldments by Magnetic Barkhausen Noise technique. NDT&E International, 2010. Vol 43. 29-33 s. DOI:10.1016/j.ndteint.2009.08.003
34. Kandil, F.A., Lord, J.D., Fry, A.T., Grant, P.V. A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection. NPL Materials Centre, 2001. ISSN: 1473-2734
35. Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M. & Sihvonen, P. Valmistustekniikka. 11.painos. Otatieta Oy, 1985. 490 s. ISBN 951-672-333-0.
36. Aaltonen, K., Ekman, K., Kamppari, J., Kauppinen, V., Kivivuori, S., Paro, J. & Vuorinen, J.J. Työvälinetekniikka. Otatieta Oy, 1991. 281 s. ISBN 951-672-123-0.
37. Aunio, M., Kettunen, E., Kääriä, H., Niinimäki, M. & Riski, P. Työvälinesuunnittelu. Valtion painatuskeskus, 1989. 340 s. ISBN 951-861-729-5.
38. Subramonia, S. Blanking. 1-17 s. Teoksessa: Altan, T. & A.E Tekkaya. Sheet Metal Forming - Processes and Applications. ASM International, 2012. ISBN 978-1-61503-844-2. 420 s.
39. Trumpf. TruServices Punching Tools Catalog, kuvasto. Saatavilla: <http://www.us.trumpf.com/en/products/machine-tools/services/punching-tools-and-accessories.html>. [Viitattu: 12.1.2016]
40. Kauste, M. Ohutlevyn leikkaus. Metalliteollisuuden kustannus Oy, 1987. 75 s. ISBN 951-817-374-5.

41. SFS 5804. Meistotekniikka - Meistettyjen teräosien suunnitteluohjeita, standardi. Suomen standardisoimisliitto SFS. 2.painos.
42. Ruukki, Kuumavalssatut teräslevyt ja -kelat - Mekaaninen leikkaus, 2011. Saatavilla: <http://www.ruukki.hu/~media/Finland/Files/Terastuotteet/Kuumavalssatut%20-%20kasittelyohjeet/Ruukki-Kuumavalssatut-ter%C3%A4kset-Mekaaninen-leikkaus.pdf> [Viitattu: 12.1.2016]
43. Brecher, C. Integrative Production Technology for High-Wage Countries. Springer, 2012. 1096 s. ISBN 978-3-642-21066-2.
44. Verbeken, K., Infante-Danzo, I., Barros-Lorenzo, J., Schneider, J. & Houbaert, Y. Innovative Processing for Improved Electrical Steel Properties. *Revista De Metalurgia*, 2010. Vol 46. 458-468 s. DOI: 10.3989/revmetalm.1010
45. SFS-EN 10106. Cold rolled non-oriented electrical steel strip and sheet delivered in the fully processed state, standardi. Suomen Standardisoimisliitto, standardi vahvistettu 20.11.2015.
46. Bourchas, K. Manufacturing Effects on Iron Losses in Electrical Machines. Diplomityö, Royal Institute of Technology, Stockholm, School of Electrical Engineering, 2015. 85s.
47. Pyrhönen, J. Magneettiset materiaalit. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, energiatekniikan osasto, tutkimusraportti EN B-74, 1992. 102 s. ISBN 951-763-721-7.
48. Nippon Steel News, Electrical Steel Sheet of Nippon Steel, 2004. Saatavilla: <http://www.nssmc.com/en/company/publications/monthly-nsc/pdf/2006121813564612855.pdf> [Viitattu: 12.1.2016]
49. Dr. Jansen, A. Grain Oriented Electrical Steel for Energy Efficient Transformers. Thyssenkrupp Electrical Steel, Esitys 6.6.2013. 23s. [Viitattu: 12.1.2016]
50. Aura, L. & Tonteri, A.J. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3.-5. painos. WSOY, 2005. 448 s. ISBN 951-0-21385-3.
51. Luomi, J., Niiranen, J. & Niemenmaa, A. Sähkömekaniikka ja sähkökäytöt osa 1. Teknillisen korkeakoulun Tehoelektroniikan laboratorio ja sähkömekaniikan laboratorion luentomonisteita, opintojakson S-17.102, Luentomoniste, 2004. 164 s.
52. Hirvonen, R. Epätahtikoneen rautahäviöt. Teknillinen korkeakoulu, Sähkömekaniikan laboratorio, raportti 16, 1983. 119s. ISBN 951-753-066-8.
53. Itaca. Basic Electrical Engineering, Part 5 - Magnetic Materials. Saatavilla: <http://www.itacanet.org/basic-electrical-engineering/part-5-magnetic-materials>. [Viitattu 20.1.2016]
54. Haiji, H., Okada, K., Hiratani, T., Abe, M. & Ninomiya, M. Magnetic Properties and Workability of 6,5% Si Steel Sheet. *Journal of Magnetic Materials*, 1996. Vol 160. 109-114 s. DOI: 10.1016/0304-8853(96)00128-X.
55. Moses, A.J., Derebasi, N., Loisos, G. & Schoppa, A. Aspects of the cut-edge effect stress on the power loss and flux density distribution in electrical steel sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000. Vol 215-216. 690-692 s. DOI: 10.1016/S0304-8853(00)00260-2.
56. Shah, S.B., Rasilo, P., Belahcen A. & Arkkio, A. Modeling of Losses Due to Inter-Laminar Short-Circuit Currents in Lamination Stacks. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 2013. Vol 3. 31-36 s. DOI: 10.2478/ecce-2013-0012
57. Harstick, H.M.S., Ritter, M. & Riehmann, W. Influence of Punching and Tool Wear on the Magnetic Properties of Nonoriented Electrical Steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014. Vol 50. DOI 10.1109/TMAG.2013.2285243
58. Arshad, W.M., Ryckebusch, T., Magnussen, F., Lendenmann, H., Soulard, J., Eriksson, B. & Malmros, B. Incorporating lamination processing and component manufacturing in electrical machine design tools. *Industry Applications Conference*, 2007. 94-102 s. DOI: 10.1109/07IAS.2007.21.
59. Paltanea, V. Paltanea, G. & Gavrilă, H. Magnetic Anisotropy in Silicon Iron Alloys. *Electrical and Electronic Engineering*, 2012. Vol 6. 383-388 s. DOI: 10.5923/j.eee.20120206.07

60. Belkasim, M. Identification of Loss Models from Measurements of the Magnetic Properties of Electrical Steel Sheets. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, sähkötekniikan osasto, Espoo. 2008. 97 s.
61. Cook, R.D. Finite Element Modeling for Stress Analysis. John Wiley & Sons INC, 1995. 320 s. ISBN 0-471-10774-3.
62. Samuelsson, A. & Wiberg, N-E. Finite Element Method Basics. Studentlitteratur, 1998. 430 s. ISBN 91-44-00927-5.
63. Haataja, J., Heikonen, J., Leino, Y., Rahola, J., Ruokolainen, J., Savolainen, V & CSC - Tieteellinen laskenta Oy. Numeeriset menetelmät käytännössä. Picaset Oy, 1999. s.381. ISBN 952-9821-57-3.
64. Becker, A.A. An Introductory Guide to Finite Element Analysis. 1.painos. Professional Engineering Publishing, 2004. 171 s. ISBN 1-86058-410-1.
65. Belytschko, T., Liu, W.K., Moran, B. & Elkhodary, K.I. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. 2.painos. John Wiley & Sons LTD, 2014. 830 s. ISBN 978-1-118-63270-3.
66. Bonet, J. & Wood, R.D. Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis. Cambridge University Press, 1997. 248 s. ISBN 0-521-57272-X.
67. Laakso, S.V.A. Development of Material Models and Acquisition of Model Parameters for Metal Cutting Simulations. Aalto-yliopisto, väitöskirja, 2015. 49 s. ISBN 978-952-60-6523-6.
68. Scientific Forming Technologies Corporation, Deform kotisivu. Saatavilla: www.deform.com. [Viitattu 23.3.2016]
69. Gogent Surahammars AB, M400-50A materiaaliesite. Saatavilla: <http://cogent-power.com/cms-data/downloads/m400-50a.pdf>. [Viitattu: 22.3.2016]
70. Aperam South America. Electrical Steels Grain Oriented (GO) & Non-Oriented (NGO), materiaaliesite. Saatavilla: <http://brasil.aperam.com/wp-content/uploads/2015/11/Electrical-Steels-Grain-Oriented-GO-and-Non-Oriented-NGO.pdf>. [Viitattu: 22.3.2016]
71. JFE Steel Corporation. Electrical Steel Sheets JFE G-core, materiaaliesite. Saatavilla: <http://www.jfe-steel.co.jp/en/products/electrical/catalog/f1e-001.pdf>. [Viitattu: 22.3.2016]
72. Čada, R. & Zlámálík, J. Materials Comparison of Cutting Tools Functional Parts for Cutting of Electrical Engineering Sheets. Technical University of Ostrava, Mechanical Series, 2012. Vol 1. 33-42 s.
73. Klimczy, P.K., Anderson, P., Moses, A. & Davies, M. Influence of Cutting Techniques on Magnetostriction Under Stress of Grain Oriented Electrical Steel. IEEE Transactions on Magnetics, 2012. Vol 48. 1417-1420 s. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2174626